



**Leandro Miguel Rodrigues Morgado**

Licenciado em Ciências da Engenharia  
Electrotécnica e de Computadores

## **Desenvolvimento de um Simulador para Aumento da Eficiência Energética na Iluminação**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Electrotécnica e de Computadores**

Orientador: João Murta Pina, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Co-orientador: Bruno Espírito Santo, Gestor de Projectos, EDP - Comercial

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Paulo da Costa Luís da Fonseca Pinto

Arguente: Prof. Doutor Pedro Miguel Ribeiro Pereira

Vogal: Prof. Doutor João Miguel Murta Pina



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Março, 2018**



## **Desenvolvimento de um Simulador para Aumento da Eficiência Energética na Iluminação**

Copyright © Leandro Miguel Rodrigues Morgado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor João Murta Pina, pela disponibilidade e orientação durante o desenvolvimento desta dissertação, no qual me concedeu a oportunidade de participar num projecto com impacto a nível nacional.

À EDP Comercial, especialmente ao engenheiro Bruno Espírito Santo pela apresentação do projecto e pela cedência de dados, assim como todos os colegas conhecidos na EDP Comercial pelos conselhos e apoio prestado, facilitando a minha integração e permitindo adquirir conhecimentos necessários para a minha evolução.

Por fim gostaria de agradecer à minha família e amigos por toda a motivação e apoio que me transmitiram durante esta etapa académica, pois sem eles todo o percurso realizado seria impossível. A todos os que nunca duvidaram das minhas capacidades e me permitiram fazer sempre mais e melhor.

A todos eles um grande e eterno Obrigado!



## Resumo

---

Nas últimas décadas o consumo de energia tem vindo a aumentar, causando diversos problemas ambientais e diminuindo os recursos fósseis disponíveis. Assim sendo foram implementadas metas mundiais de forma a apostar nos recursos renováveis e em tecnologias que contribuam para o aumento da eficiência energética. A iluminação é uma das áreas com maiores custos energéticos para as empresas, sendo possível reduzir o consumo energético através da introdução de tecnologias LED que não afectem o bem estar dos utilizadores, permitindo reduzir os desperdícios energéticos.

O trabalho que conduziu a esta dissertação foi inserido no projecto *Save to Compete* proposto pela EDP e baseou-se na criação de um simulador para empresas com objectivo de avaliar os sistemas de iluminação antigos e proceder à troca por outros equipamentos mais eficientes do tipo LED. Inicialmente foram analisados outros softwares existentes no mercado, com o intuito de criar um simulador que permita aos utilizadores descrever os sistemas de iluminação dependendo do seu grau de conhecimento, sendo no final apresentada uma proposta com o investimento, retorno e impactos energéticos esperados.

**Palavras-chave:** Eficiência energética, Consumo energético, LED, Sistemas de iluminação, Simulador.

---





## Abstract

---

In the last decades energy consumption has been increasing causing many environmental problems and reducing the fossil resources available. Due to all these problems, it was needed to implement some global goals for countries to focus on renewable resources and other technologies that contribute to the increase of energy efficiency. Lighting is one of the areas with higher energy costs for companies, so it is possible to reduce the energy bill by introducing LED technologies that don't affect the users, allowing companies to reduce the energy waste.

The present dissertation was inserted in the Save to Compete project proposed by EDP, which consists in a development of a simulator for the companies to evaluate the older lighting systems and exchange them by other more efficient LED type. This document will address other softwares on the market, in order to improve and create a simulator that allows the users to describe their lighting systems depending on their actual knowledge. At the end should be presented a report after the simulation process with all investments, return on capital and expected energy impacts.

**Keywords:** Energy efficiency, Energy costs, LED, Lighting systems, Simulator.

---



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>XV</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XVII</b>
<b>LISTA DE ACRÓNIMOS E SÍMBOLOS .....</b>	<b>XIX</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO .....	1
1.2. OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO .....	3
1.3. PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO .....	3
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	4
<b>2. ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>5</b>
2.1. PRINCÍPIOS E GRANDEZAS LUMINOTÉCNICAS .....	5
2.1.1. Visão .....	6
2.1.2. Luz e Espectro Electromagnético .....	6
2.1.3. Cor .....	8
2.1.4. Fluxo Luminoso .....	10
2.1.5. Intensidade Luminosa .....	10
2.1.6. Luminância .....	11
2.1.7. Iluminância .....	12
2.1.8. Eficiência Luminosa .....	13
2.1.9. Temperatura de cor .....	13
2.1.10. Índice de Restituição de Cor .....	14

2.1.11.	Tabela Resumo de grandezas .....	16
2.2.	LÂMPADAS.....	17
2.2.1.	Tempo de Vida Útil.....	17
2.2.2.	Tipos de Lâmpadas.....	17
2.2.2.1.	Lâmpadas Incandescentes.....	18
2.2.2.2.	Lâmpadas de Descarga.....	20
2.2.2.3.	Lâmpadas de Indução.....	26
2.2.2.4.	Lâmpadas LED.....	27
2.2.2.5.	Comparação dos diversos tipos de lâmpadas.....	29
2.2.3.	Dispositivos Auxiliares .....	30
2.2.3.1.	Arrancadores.....	30
2.2.3.2.	Drivers.....	31
2.2.3.3.	Balastros.....	32
2.3.	LUMINÁRIAS.....	34
2.3.1.	Tipos de Luminárias .....	35
2.3.2.	Classificação fotométrica .....	38
2.3.3.	Sistemas de controlo .....	38
2.3.3.1.	Interruptor On/Off.....	39
2.3.3.2.	Temporizadores .....	39
2.3.3.3.	Sensores de presença .....	40
2.3.3.4.	Sensores Crepusculares.....	41
2.3.3.5.	Dimming .....	42
2.4.	SIMULADORES PARA OPTIMIZAÇÃO .....	42
2.4.1.	Identificação de medidas .....	43
2.4.2.	Simuladores no mercado .....	44
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>47</b>
3.1.	SIMULADOR EDP.....	47
3.2.	ARQUITECTURA DO SIMULADOR.....	49
3.3.	PROCESSO DO SIMULADOR.....	51
3.3.1.	Módulo detalhado.....	52
3.3.2.	Módulo rápido.....	55
3.3.3.	Comparação Módulo detalhado vs Módulo rápido .....	57
3.4.	METODOLOGIA DO AUDITOR.....	58
<b>4.</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO.....</b>	<b>61</b>
4.1.	SOFTWARE.....	61
4.2.	CONSTRUÇÃO DO SIMULADOR.....	62
4.2.1.	Avaliação de Luminárias/Lâmpadas target.....	62
4.2.2.	Identificação do sistema de iluminação.....	64
4.2.3.	Identificação de soluções.....	66

4.2.4.	Análise dos sistemas .....	68
4.2.5.	Funcionalidades do Módulo rápido .....	70
4.3.	<i>FICHA SITE-SURVEY</i> .....	72
<b>5.</b>	<b><i>CASOS DE ESTUDO</i></b> .....	<b>75</b>
5.1.	<i>ESCOLHA DOS CASOS DE ESTUDO</i> .....	75
5.1.1.	Caso de estudo 1 .....	76
5.1.2.	Caso de estudo 2 .....	78
<b>6.</b>	<b><i>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</i></b> .....	<b>81</b>
6.1.	<i>PRINCIPAIS CONCLUSÕES</i> .....	81
6.2.	<i>TRABALHOS FUTUROS</i> .....	82
	<b><i>BIBLIOGRAFIA</i></b> .....	<b>85</b>



## Lista de Figuras

Figura 2.1: Diagrama da estrutura do sistema visual [4].....	6
Figura 2.2: Espectro Electromagnético [5] .....	7
Figura 2.3: Curva de sensibilidade do olho a radiação visível [5].....	8
Figura 2.4: Interação entre fonte de luz e objecto [8] .....	9
Figura 2.5: Diagrama de cromaticidade CIE [6].....	9
Figura 2.6: Exemplo de fluxo luminoso [10].....	10
Figura 2.7: Ângulo Sólido [11].....	11
Figura 2.8: Luminância [12] .....	11
Figura 2.9: Exemplo de Iluminância [10] .....	12
Figura 2.10: Eficiência luminosa para diferentes tipos de lâmpadas [5] .....	13
Figura 2.11: Temperatura de cor [10].....	14
Figura 2.12: Índices de restituição cromática [13].....	15
Figura 2.13: Constituição da lâmpada incandescente [14] .....	18
Figura 2.14: Partição da energia consumida por uma lâmpada incandescente [14].....	18
Figura 2.15: Ciclo do halogéneo [14].....	20
Figura 2.16: Princípio de funcionamento da lâmpada de vapor de mercúrio [17] .....	22
Figura 2.17: Lâmpada de vapor de sódio de alta pressão [14].....	23
Figura 2.18: Operação de uma lâmpada fluorescente linear [20] .....	25
Figura 2.19: Tipos de lâmpada fluorescente linear [22] .....	25
Figura 2.20: Lâmpadas fluorescentes compactas [15] .....	26
Figura 2.21: Operação de uma lâmpada de indução [23] .....	27
Figura 2.22: Funcionamento de um LED [23].....	28
Figura 2.23: Circuito da lâmpada com recurso a arrancador [26] .....	31
Figura 2.24: Balastro electromagnético [27].....	33

Figura 2.25: Eficiência da lâmpada com variação da frequência [28] .....	33
Figura 2.26: Balastro electrónico [27] .....	34
Figura 2.27: Constituição de uma luminária [6] .....	34
Figura 2.28: Campânula [29] .....	35
Figura 2.29: Pannel rectangular [29] .....	36
Figura 2.30: Downlight [29] .....	36
Figura 2.31: Luminária estanque [29] .....	37
Figura 2.32: Projector [29] .....	37
Figura 2.33: Curva de distribuição de uma luminária [5] .....	38
Figura 2.34: Exemplo de funcionamento do sensor ultra-sónico [4] .....	40
Figura 2.35: Interruptor crepuscular [30] .....	41
Figura 2.36: Simulador de iluminação Ledvance [31] .....	44
Figura 2.37: Simulador de iluminação Philips [32] .....	45
Figura 2.38: Simulador Current - Módulo de impacto energético e ambiental [33] .....	46
Figura 3.1: Esquema do projecto Save to Compete para iluminação [34] .....	48
Figura 3.2: Arquitectura do simulador .....	49
Figura 3.3: Fluxograma do processo do módulo detalhado .....	52
Figura 3.4: Fluxograma do processo do módulo detalhado (continuação) .....	53
Figura 3.5: Fluxograma do processo do módulo rápido .....	55
Figura 3.6: Fluxograma da metodologia auditor .....	58
Figura 4.1: Exemplo do quadro de soluções .....	63
Figura 4.2: Quadro de inputs do utilizador .....	65
Figura 4.3: Dados do cenário de substituição .....	67
Figura 4.4: Dados do cenário de retrofit .....	67
Figura 4.5: Escolha do racional .....	68
Figura 4.6: Resumo energético situação actual .....	69
Figura 4.7: Resumo energético proposto .....	69
Figura 4.8: Comparação Investimento vs Poupanças .....	70
Figura 4.9: Pré-simulação do módulo rápido .....	70
Figura 4.10: Processo first guess .....	71
Figura 4.11: Mapa de distribuição .....	72
Figura 4.12: Quadros da ficha Site-Survey .....	73
Figura 5.1: Racional económico do caso de estudo 1 .....	77
Figura 5.2: Racional económico do caso de estudo 2 .....	79



## Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Resumo de grandezas luminotécnicas .....	16
Tabela 2.2: Características dos diversos tipos de lâmpadas [6], [15], [23].....	29
Tabela 3.1: Comparação de processos entre módulo detalhado e módulo rápido .....	57
Tabela 5.1: Situação actual do caso de estudo 1.....	76
Tabela 5.2: Situação proposta para caso de estudo 1 .....	76
Tabela 5.3: Impactos esperados para caso de estudo 1 .....	77
Tabela 5.4: Situação actual do caso de estudo 2.....	78
Tabela 5.5: Impactos esperados para caso de estudo 2 .....	78



## Listas de Acrónimos e Símbolos

€	Euro
cd	Candela
CFL	Compact Fluorescent Lamps
CIE	Comission International de l'Eclairage
$CO_2$	Dióxido de Carbono
DGEG	Direcção Geral de Energia e Geologia
E	Iluminância
EDP	Energias de Portugal
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
$\eta$	Eficiência Luminosa
$\Phi$	Fluxo luminoso
GEE	Gases com Efeito de Estufa
HID	High Intensity Discharge
Hz	Hertz
I	Intensidade luminosa
IRC	Índice de Restituição de Cor
K	Kelvin

kHz	kilo Hertz
kWh	kilo Watt hora
L	Luminância
LED	Light Emitting Diode
LFL	Linear Fluorescent Lamps
lm	Lúmen
lx	Lux
m	metro
mm	milímetro
MHz	Mega Hertz
nm	nanómetro
PNAEE	Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética
PNAER	Plano Nacional de Acção para as Energias Renováveis
PPEC	Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de Energia Eléctrica
PRI	Período de Retorno do Investimento
RSD	Reflected Spectral Distribution
S2C	Save to Compete
SPD	Spectral Power Distribution
sr	Esferorradiano
SRD	Spectral Reflectance Distribution
Tc	Temperatura de Cor
UE	União Europeia
VSAP	Vapor de Sódio de Alta Pressão
W	Watt



# Introdução

## 1.1. Enquadramento e Motivação

A nível mundial a sociedade enfrenta problemas energéticos devido à exploração excessiva de recursos fósseis e problemas ambientais devido ao excesso de emissões de  $CO_2$  levando à destruição dos ecossistemas. Para todos estes problemas foi necessário implementar medidas que visam a eficiência energética e uma gestão racional de energia com objectivo de reduzir o índice de dependência energética dos países sem capacidade de exploração. Em Portugal este índice situa-se nos 74.8%, tendo tendência para diminuir devido à forte aposta do país em fontes endógenas, uma vez que em 2007 o nível de dependência era de 83.9%.

Desta forma a União Europeia (UE) lançou um quadro com medidas climáticas no qual se pretende que até 2020 exista uma redução do consumo de energia primária em 20%, reduzir 20% as emissões de GEE (Gases com efeito de estufa) e que seja promovida a energia renovável por forma a que 20% da energia total consumida provenha de fontes renováveis [1].

A nível nacional através do Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética (PNAEE) e do Plano Nacional de Acção para as Energias Renováveis (PNAER) pretende-se actuar nas seguintes áreas: Transportes, Residencial, Serviços, Indústria, Estado e Agricultura, através de medidas que promovam novas tecnologias garantindo uma melhoria na eficiência energética e que assegurem uma sustentabilidade económica e ambiental sem comprometer o crescimento do

país e aumentando a competitividade da economia devido à redução de custos energéticos, gerando verbas para novos investimentos internos nas empresas [2].

Uma outra medida que visa a eficiência energética é proposta através do Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de Energia Eléctrica (PPEC), que promove medidas tangíveis através da troca dos equipamentos actuais por outros mais eficientes e medidas intangíveis através da divulgação de boas práticas na utilização da energia eléctrica com finalidade de mudar os hábitos dos utilizadores. O PPEC constitui assim uma oportunidade para as empresas trocarem o seu sistema de iluminação visto que financia até 45.9% do custo total do projecto, sendo que a verba disponível do financiamento está pendente das poupanças energéticas do projecto. Desta forma a Entidade Reguladora de Serviços Energéticos (ERSE) e a Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG) avaliam os projectos que pretendam candidatar-se para esta medida, sendo que projectos mais eficientes beneficiam de um maior investimento [2].

A iluminação é uma das áreas abrangida por estas medidas, pois constitui um papel fundamental na sociedade sendo que para os diversos sectores (Serviços, Indústria e Doméstico) a energia eléctrica consumida na iluminação pode representar até 20% do consumo total de electricidade [2].

A eficiência energética na escolha de lâmpadas constitui apenas mais um factor que pode resultar numa diminuição da factura energética, pelo facto de o consumo da lâmpada ser menor mas ao qual se acresce o factor de que lâmpadas pouco eficientes dissipam mais energia sobre a forma de calor, levando a um aumento de temperatura do local, podendo implicar por sua vez a utilização de sistemas de climatização de forma mais recorrente [3]. Desta forma são pretendidas fontes de luz que convertam o máximo de energia eléctrica em energia luminosa.

Por todos estes motivos apresentados a introdução de novas tecnologias na iluminação representa uma área com grande potencial para o aumento da eficiência energética bem como na redução das emissões de  $CO_2$ , assegurando o bem estar dos utilizadores e reduzindo o desperdício energético.

## **1.2.Objectivos da Dissertação**

Tal como referido anteriormente as normas europeias para o aumento da eficiência energética tendem a ficar mais rigorosas e a procura por equipamentos mais eficientes e com menor custo operacional tende a aumentar.

Desta forma a presente dissertação tem como objectivo a construção de um simulador que procede a uma análise da eficiência energética do sistema de iluminação do cliente e caso financeiramente viável é proposta uma solução mais eficiente e sustentável comparativamente com o cenário de iluminação existente.

Assim neste documento são apresentadas as etapas necessárias para a elaboração de um simulador para aumento da eficiência energética, que como resposta deverá apresentar soluções para os diversos sistemas de iluminação actuais, tendo como base os vários níveis de conhecimento do utilizador para a descrição dos sistemas.

## **1.3.Principais contribuições da dissertação**

Actualmente muitas empresas procuram aumentar a competitividade no seu mercado, tentando melhorar e valorizar os seus activos, enquanto que o desperdício de recursos é uma das grandes preocupações pois tem um impacto económico negativo, procurando estas reduzir custos desnecessários.

Face a estes problemas, uma forma no qual se consegue monitorizar gastos energéticos é através de uma auditoria, sendo que o recurso a simuladores constitui uma oportunidade permitindo identificar novas tecnologias energeticamente mais eficientes assim como possibilita uma rápida visualização dos resultados passíveis de serem alcançados.

A presença de simuladores na área da iluminação não é novidade. No entanto, não é comum encontrar numa plataforma um simulador que permita aos utilizadores simular consoante o seu nível de conhecimento, assim como no final poderem escolher de entre as soluções apresentadas. Desta forma o trabalho que conduz à elaboração desta dissertação é aplicado em empresas que como serviço final vão beneficiar num aumento da eficiência energética na iluminação

permitindo assim aumentar a competitividade na empresa através da redução da factura energética, disponibilizando assim verbas para outros sectores da empresa.

#### **1.4.Organização da Dissertação**

A presente dissertação encontra-se dividida nos seguintes capítulos:

- Capítulo 1 - Destinado à Introdução, sendo abordado o enquadramento do tema, motivações, contribuições e objectivos do trabalho para a elaboração da presente dissertação.
- Capítulo 2 - Referente ao Estado da Arte, no qual são descritos os princípios e grandezas luminotécnicas, assim como os sistemas de iluminação necessários para a compreensão do simulador. Por fim são apresentados os simuladores existentes no mercado, sendo posteriormente realizada uma análise às suas funcionalidades.
- Capítulo 3 - Apresenta a Metodologia proposta, no qual é abordada a arquitectura do simulador sendo posteriormente descrito todos os seus processos.
- Capítulo 4 - Destinado à Implementação, onde se encontram referidas todas as etapas necessárias para a construção do simulador, assim como as diferentes abordagens para a implementação do módulo detalho e módulo rápido.
- Capítulo 5 - Refere os Casos de estudo, sendo apresentada uma análise e os impactos esperados resultantes da troca do sistema de iluminação.
- Capítulo 6 - Apresenta as Conclusões, no qual são apresentadas as principais conclusões e trabalhos futuros a desenvolver.



# 2

## Estado da Arte

Este capítulo tem como objectivo apresentar uma breve revisão sobre alguns princípios básicos e grandezas luminotécnicas, estando estes referenciados na secção 2.1. Após a apresentação de conceitos, nas secções 2.2 e 2.3 são descritos os diversos tipos de tecnologia existentes e sistemas de controlo, por forma a compreender o seu funcionamento assim como a sua importância para a descrição dos sistemas de iluminação. Por fim na secção 2.4 são abordados os simuladores existentes no mercado, onde é explicada a importância da análise computacional e se procede a uma avaliação dos simuladores actuais.

### 2.1.Princípios e Grandezas Luminotécnicas

A iluminação encontra-se presente no nosso dia-a-dia, representando um papel fundamental na forma como interagimos com os objectos. Deste modo é importante perceber alguns princípios básicos para entender como é processada essa interacção.

Do mesmo modo para optimizar um sistema de iluminação, devem ser definidos alguns factores que garantam a qualidade da iluminação e que contribuam para o bem-estar da zona iluminada, sendo que por regra cada local tem as suas normas e estas devem ser seguidas quer a nível de iluminação do espaço, quer na qualidade de reprodução de cor que em alguns espaços tem um carácter fundamental. Desta forma o projectista deve estudar o local alvo e garantir que as principais grandezas são respeitadas.

### 2.1.1. Visão

A iluminação representa um papel fundamental na visão visto existir uma dependência da quantidade de luz precisa para se conseguir fornecer condições visuais necessárias para que os seres humanos possam operar de forma eficaz e eficiente. Desta forma é importante perceber as características físicas e percetuais do sistema visual para prever o comportamento humano em função das condições de iluminação.

O sistema visual é um sistema contínuo de processamento de imagens, levando a que olho e o cérebro troquem informações com objectivo de interpretar o ambiente visual, sendo que desta forma o olho tem a função de transformar estímulos luminosos em impulsos que vão ser transmitidos para o cérebro através dos nervos ópticos [4].

Estes impulsos são transmitidos numa fase inicial para o núcleo geniculado lateral e posteriormente para o córtex visual para processamento visual da imagem final.

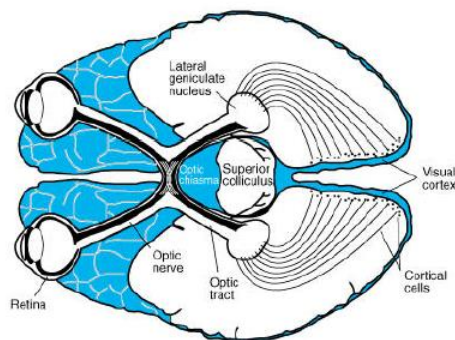
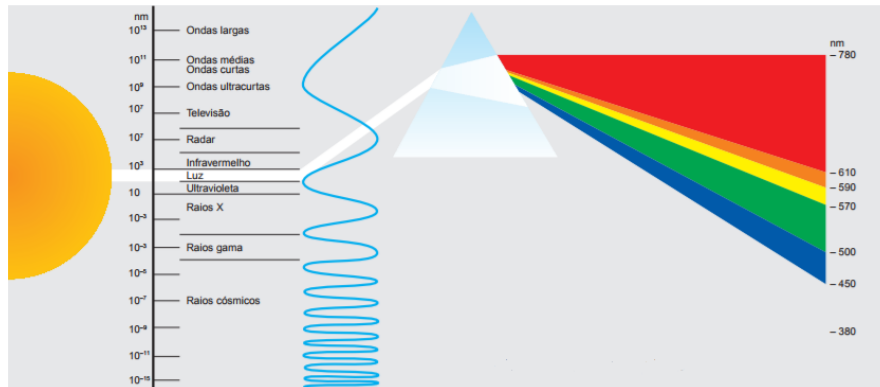


Figura 2.1: Diagrama da estrutura do sistema visual [4]

### 2.1.2. Luz e Espectro Electromagnético

A luz pode ser definida como sendo a radiação electromagnética que provoca uma sensação visual para o ser humano. Outros tipos de radiação electromagnética existente podem ser ondas de rádio, microondas, infra-vermelhos, radiação ultravioleta, entre outras.



**Figura 2.2: Espectro Electromagnético [5]**

Como pode ser observado pela Figura 2.2, toda a radiação electromagnética possui diferentes comprimentos de onda sendo que apenas um certo intervalo é sensível ao olho humano, tipicamente entre 380 nm e 780 nm, e a restante permanece como radiação não visível. Estes comprimentos de onda do espectro visíveis são interpretados pelo olho humano como uma gama de cores - desde o vermelho, laranja, azul até ao violeta conforme o comprimento de onda vai diminuindo.

Para comprimentos de onda superiores à cor vermelha a radiação não é visível ao olho humano, mas é sentida na forma de calor. No entanto para comprimentos de onda inferiores ao violeta está presente a radiação ultravioleta que pode causar danos graves na pele. Finalmente a luz branca é uma mistura dos comprimentos de onda visíveis, que conforme se pode ver na Figura 2.2, através de um prisma a luz é distribuída originando as cores constituintes [6].

Outro factor adicional ao comprimento de onda da radiação emitida é o nível de luminosidade, que contribui também para causar uma sensibilidade visual. A luminosidade durante o dia permite distinguir melhor as cores, sendo obtida uma maior percepção para comprimentos de onda próximos de 555 nm, enquanto que no período nocturno devido à fraca luminosidade é gerada uma menor intensidade de sensação para comprimentos de onda cerca de 500 nm que correspondem a tons próximos do azul e verde [5].

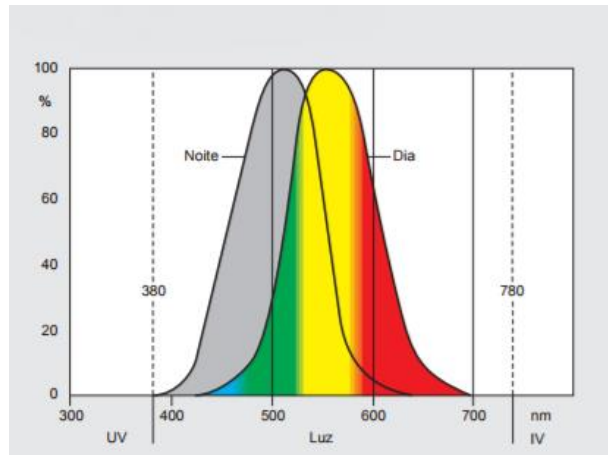


Figura 2.3: Curva de sensibilidade do olho a radiação visível [5]

### 2.1.3. Cor

A cor está relacionada com a sensação visual provocada pela incidência dos fótons na retina do olho humano, que posteriormente vão transmitir informação aos nervos ópticos.

A cor é a forma como se distingue os diferentes comprimentos de onda da luz, sendo que a percepção da cor é resultado das características espectrais da fonte de luz que variam dependendo da reflexão do objecto e do ponto de visualização do observador [7].

Apesar de a cor de uma fonte de luz depender da composição espectral da luz emitida pela própria fonte, a cor aparente de uma superfície reflectora é calculada por duas características: a distribuição espectral da fonte de luz (*Spectral Power Distribution - SPD*) e a característica de refletância do objecto a iluminar (*Spectral Reflectance Distribution - SRD*), sendo que da interacção entre a fonte de luz e o objecto resulta a distribuição espectral reflectida (*Reflected Spectral Distribution - RSD*) [7].

A cor de um dado objecto é determinada pelas frequências de onda que esse mesmo objecto reflecte. Assim um espectro de refletância para um dado objecto de uma certa cor mostra que as frequências com comprimento de onda dessa mesma cor vão ser na sua grande maioria reflectidas, enquanto para frequências diferentes essas ondas são absorvidas.

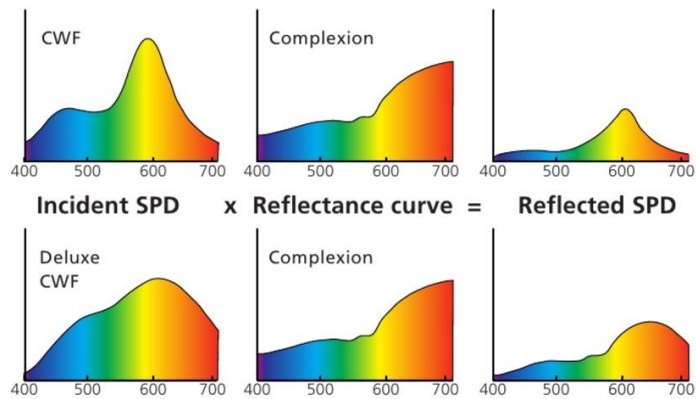


Figura 2.4: Interação entre fonte de luz e objecto [8]

Como se pode observar na Figura 2.4, duas fontes de luz com espectros diferentes estão representadas na primeira coluna e quando incidem sobre um mesmo objecto, cujo espectro se encontra na segunda coluna, originam resultados diferentes e consequentemente o objecto final apresenta cores diferentes para o olho humano, sendo os resultados observados na terceira coluna. Pode-se então concluir que a cor representa uma sensação que nos permite diferenciar os objectos com maior precisão.

Todo o espectro de cores sensível ao olho humano é representado através do diagrama de cromaticidade CIE que foi criado pela Comissão Internacional de Iluminação, no qual se pretende encontrar a cor que resulta da interação entre fontes de luz, sendo que a coordenada X do diagrama representa a cromaticidade do espectro e a coordenada Y mede a luminosidade. Assim através das chamadas coordenadas cromáticas é possível encontrar a cor resultante que é observada por nós [4].

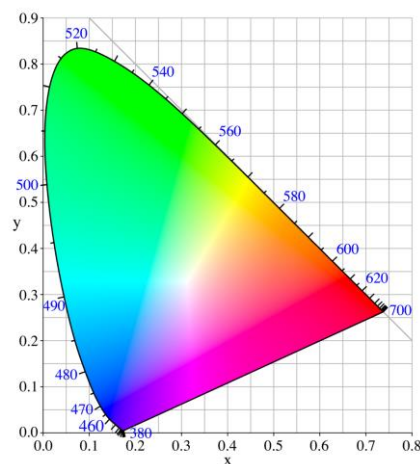


Figura 2.5: Diagrama de cromaticidade CIE [6]

#### 2.1.4. Fluxo Luminoso

O Fluxo Luminoso é representado pelo símbolo ( $\Phi$  ou  $F$ ) e define-se como sendo a quantidade total de luz emitida em todas as direcções por uma fonte de luz em cada segundo que provoca um estímulo visual. A radiação emitida e visível tem um comprimento de onda de 380 nm a 780 nm. Esta grandeza vai influenciar a eficiência dos equipamentos, sendo a sua unidade o lúmen (lm) [9].

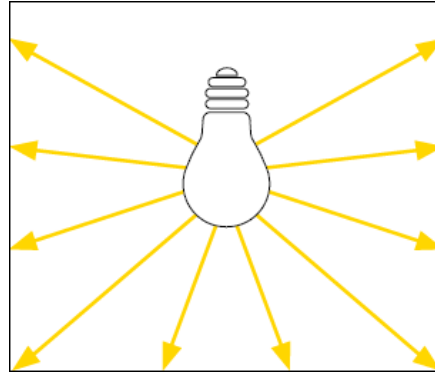


Figura 2.6: Exemplo de fluxo luminoso [10]

#### 2.1.5. Intensidade Luminosa

A Intensidade Luminosa é representada pelo símbolo ( $I$ ) e considerando que uma fonte de luz não irradia uniformemente em todas as direcções caso contrário a distribuição do fluxo luminoso formava sempre uma esfera, é necessário então calcular a concentração de luz emitida numa dada direcção [5].

Assim a intensidade luminosa pode ser definida como o fluxo luminoso irradiado por uma fonte de luz numa certa direcção. A unidade desta grandeza é a candela (cd).

A intensidade luminosa é obtida pela seguinte expressão:

$$I = \frac{\Phi}{\omega} \quad (2.1)$$

Sendo que:

- $I$  - Intensidade luminosa (cd);
- $\Phi$  - Fluxo luminoso (lm);
- $\omega$  - Ângulo sólido (sr);

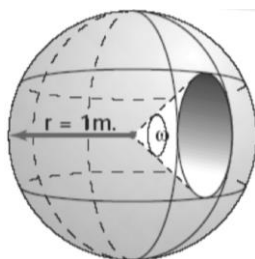


Figura 2.7: Ângulo Sólido [11]

Como podemos observar pela equação 2.1 e na Figura 2.7, a intensidade luminosa é dada pela relação entre fluxo luminoso e ângulo sólido, sendo que o conceito de ângulo sólido é definido como aquele que visto do centro de uma esfera percorre uma certa área sobre a superfície dessa esfera [4].

### 2.1.6. Luminância

A luminância é representada pelo símbolo ( $L$ ) e refere-se à intensidade luminosa irradiada por unidade de área, ou seja, descreve a quantidade de luz que é emitida por uma dada superfície, segundo um ângulo sólido. A unidade desta grandeza é a candela por metro quadrado ( $cd/m^2$ ) [12].

A luminância é calculada através da seguinte expressão:

$$L = \frac{I}{A \cdot \cos \theta} \quad (2.2)$$

Sendo que:

- $L$  - Luminância ( $cd/m^2$ );
- $I$  - Intensidade luminosa (cd);
- $A \cdot \cos \theta$  - Área aparente ( $m^2$ );

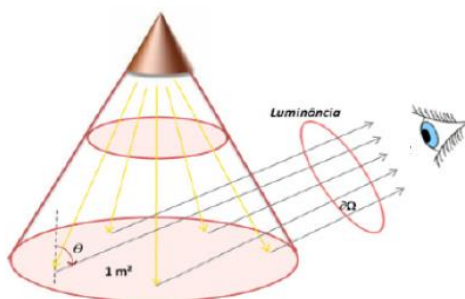


Figura 2.8: Luminância [12]

Percebe-se então que a luminância transmite uma sensação de claridade aos nossos olhos, resultante da reflexão dos raios de luz sobre uma dada direcção.

Estes raios de luz são reflectidos numa superfície aparente, formando uma área iluminada que é projectada na direcção do observador [5].

### 2.1.7. Iluminância

A iluminância é representada pelo símbolo ( $E$ ) e define-se como sendo o fluxo luminoso total irradiado por uma fonte de luz sobre uma superfície, ou seja, corresponde ao fluxo incidente por unidade de área. O valor da iluminância pode ser medido com a ajuda de um luxímetro. No entanto, como a distribuição do fluxo luminoso não é uniforme numa superfície os valores medidos com o luxímetro devem variar para os diferentes pontos da área [9]. Esta grandeza tem como unidade o lux (lx).

A iluminância tem um papel importante no estudo de projectos visto que cada local tem as suas normas em relação ao nível de lux recomendado. O plano de trabalho é um dos fatores a considerar na iluminância, uma vez que se pretende que a superfície útil do utilizador tenha os níveis de recomendados, pelo que aspectos como a altura da instalação e o fluxo luminoso da luminária devem ser considerados ao projectar a iluminação de um espaço.

A iluminância é dada pela seguinte expressão:

$$E = \frac{\Phi}{S} \quad (2.3)$$

Sendo que:

- $E$  - Iluminância (lx);
- $\Phi$  - Fluxo luminoso (lm);
- $S$  - Área da superfície iluminada ( $m^2$ );

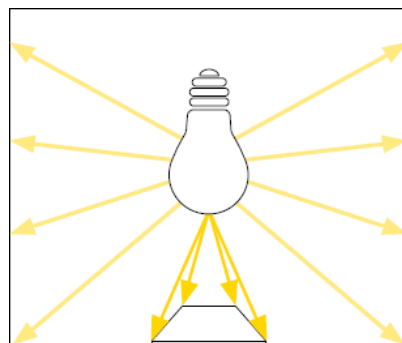


Figura 2.9: Exemplo de Iluminância [10]



### 2.1.8. Eficiência Luminosa

A Eficiência Luminosa é representada pelo símbolo ( $\eta$ ), podendo ser calculada através do quociente entre o fluxo luminoso emitido pela fonte de luz e a potência eléctrica consumida por esta. Tipicamente cada fonte de luz é representada por uma letra que indica a sua classe de eficiência energética. A unidade desta grandeza é o lúmen por Watt (lm/W).

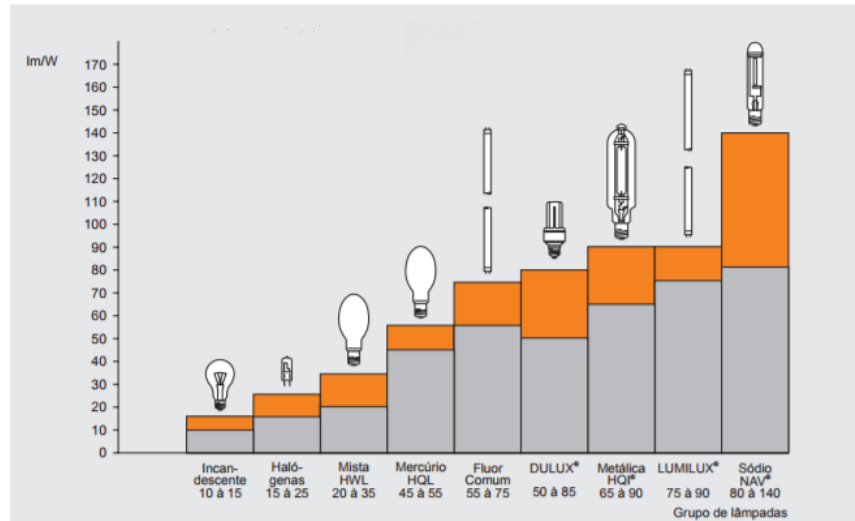


Figura 2.10: Eficiência luminosa para diferentes tipos de lâmpadas [5]

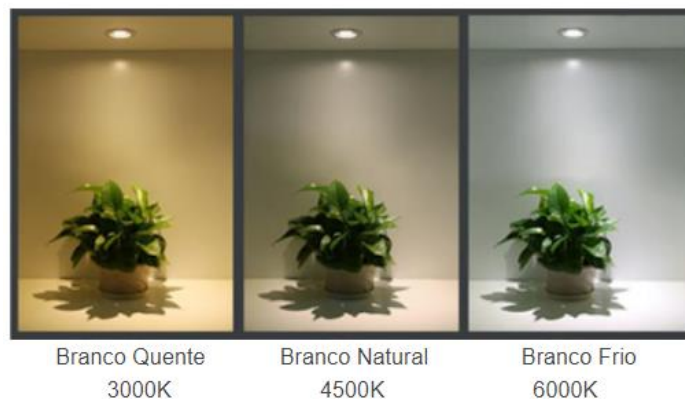
Conforme se pode verificar na Figura 2.10, os diferentes tipos de lâmpadas apresentam diversos valores de eficiência. Estes valores derivam das potências eléctricas consumidas que variam dependendo do tipo de lâmpada, sendo que cada gama de lâmpadas tem uma eficiência luminosa adequada a cada tipo de sector.

### 2.1.9. Temperatura de cor

Obter uma tonalidade de cor de um objecto é um processo difícil, que só se verifica devido à reflexão da radiação pelos objectos e do meio envolvente .

Desta forma, o conceito de temperatura de cor está relacionado com o corpo negro - este é um objecto que teoricamente absorve toda a radiação electromagnética, sendo que posteriormente emite um espectro de luz de acordo com a sua temperatura [6].

Inicialmente o corpo negro apresenta uma cor vermelha para uma temperatura inicial próxima dos 3000 Kelvin e em função do aumento da temperatura essa cor passa para uma tonalidade azul que corresponde a aproximadamente 6000 Kelvin. A unidade da temperatura de cor é o Kelvin (K).



**Figura 2.11: Temperatura de cor [10]**

A escolha da temperatura de cor de uma fonte de luz está normalmente relacionado com o local, sendo que consideram-se três gamas:

- Quente ( $T < 3300K$ )
- Intermédia ( $3300K < T < 5200K$ )
- Fria ( $T > 5200K$ )

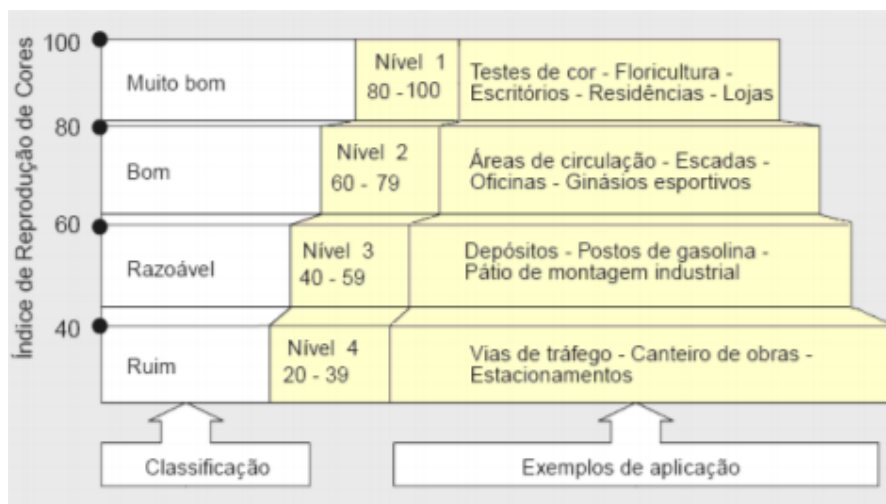
### **2.1.10. Índice de Restituição de Cor**

O Índice de Restituição de Cor (IRC) é calculado através da comparação entre o efeito da radiação emitida por uma fonte de luz sobre os objectos que ilumina e o efeito desses mesmos objectos aquando iluminados pela fonte de referência (luz solar).

O IRC indica assim a capacidade cromática que uma fonte de luz artificial tem de conseguir reproduzir/restituir as cores do objecto aquando da iluminação pela fonte de referência. Este índice tem uma escala que varia de 0 a 100%, sendo este último valor correspondente a uma restituição perfeita [6].

O IRC representa um factor relevante na iluminação visto que para certos locais é necessário que o índice esteja próximo do valor mais alto possível para

poder servir as suas finalidades, sendo que a capacidade de uma fonte de luz tem de conseguir um valor de IRC elevado é independente da temperatura de cor.



**Figura 2.12: Índices de restituição cromática [13]**

Conforme se pode observar através da Figura 2.12, o IRC encontra-se dividido em diferentes níveis consoante a sua capacidade de restituição de cor sendo que para valores até 40% é classificado como fraca a sua capacidade de replicação da cor, enquanto que para valores superiores a 80% é considerado o nível mais alto (nível 1), no qual nos encontramos na presença de fontes de luz com melhor qualidade de iluminação.

Também é perceptível através dos exemplos de aplicação que normalmente a iluminação relacionada com espaços públicos ao ar livre requer uma menor fiabilidade de reprodução de cor, enquanto que para cenários como hospitais, escritórios ou oficinas são tipicamente utilizadas lâmpadas com um IRC mais elevado.

### 2.1.11. Tabela Resumo de grandezas

As grandezas luminotécnicas referidas anteriormente encontram-se apresentadas na seguinte tabela:

Tabela 2.1: Resumo de grandezas luminotécnicas

Grandeza	Símbolo	Unidade	Definição
Fluxo Luminoso	$F$ ou $\Phi$	Lúmen (lm)	Radiação total emitida em todas as direcções por uma fonte de luz, provocando uma sensação visual.
Intensidade Luminosa	$I$	Candela (cd)	Fluxo luminoso emitido numa certa direcção.
Luminância	$L$	$\text{cd}/\text{m}^2$	Intensidade luminosa emitida por superfície.
Iluminância	$E$	Lux (lx)	Fluxo luminoso incidente por unidade de área.
Eficiência Luminosa	$\eta$	Lúmen/W	Relação entre fluxo luminoso emitido e a potência consumida numa fonte de luz.
Temperatura de cor	$T_c$	Kelvin (K)	Temperatura necessária para que um corpo negro emita radiação visível segundo um certo espectro de cor.
Índice de Restituição de cor	IRC	-	Capacidade cromática que uma fonte de luz artificial tem para reproduzir comparando com uma fonte referência (solar).

## 2.2.Lâmpadas

As fontes de luz revolucionaram a indústria da iluminação através da introdução de fontes artificiais que se tornaram fundamentais para qualquer ambiente ou espaço, sendo que com a evolução estas ganharam novas formas e a sua eficiência energética foi aumentando permitindo aos utilizadores adquirir uma economia significativa e adaptar as várias tecnologias existentes aos diversos sectores do mercado.

### 2.2.1. Tempo de Vida Útil

O tempo de vida útil é uma característica das lâmpadas, tipicamente indicada em horas no qual uma fonte de luz funciona mantendo a sua eficiência luminosa, sendo referenciada pelos seguintes índices [12]:

- **B50** - Corresponde ao número de horas no qual 50% de um lote de lâmpadas deixa de emitir fluxo luminoso;
- **L70** - Corresponde ao número de horas no qual o fluxo luminoso inicial das lâmpadas reduziu em 30%;

Desta forma o tempo de vida útil nos sistemas de iluminação constitui um factor importante nos projectos luminotécnicos, visto que quanto maior for o tempo de vida útil da fonte de luz haverá uma maior economia por parte do utilizador pois a substituição da lâmpada será realizada com menor frequência.

### 2.2.2. Tipos de Lâmpadas

As lâmpadas são fontes capazes de fornecer luz através da conversão de energia eléctrica em radiação visível. Assim existem vários tipos de lâmpadas com diversas características luminotécnicas.

As lâmpadas existentes no mercado pertencem às seguintes famílias:

- Lâmpadas de Incandescência;
- Lâmpadas de Descarga;
- Lâmpadas de Indução;
- Lâmpadas LED;

### 2.2.2.1. Lâmpadas Incandescentes

A lâmpada incandescente é uma das tecnologias mais antigas no mundo da iluminação. O seu princípio de funcionamento ocorre através da passagem de corrente eléctrica num filamento de tungsténio, que é aquecido até à incandescência. O filamento encontra-se no interior de uma ampola de vidro que é preenchida com um gás inerte, tipicamente argón [14].



Figura 2.13: Constituição da lâmpada incandescente [14]

A eficiência deste tipo de lâmpadas é proporcional com o aumento de temperatura do filamento que se encontra enrolado na forma helicoidal, permitindo assim uma maior radiação emitida na região visível do espectro. Apesar de tudo as lâmpadas incandescentes normais têm uma eficiência energética muito baixa, visto que grande parte da energia é dissipada sob forma de calor, levando a um fluxo luminoso útil baixo.

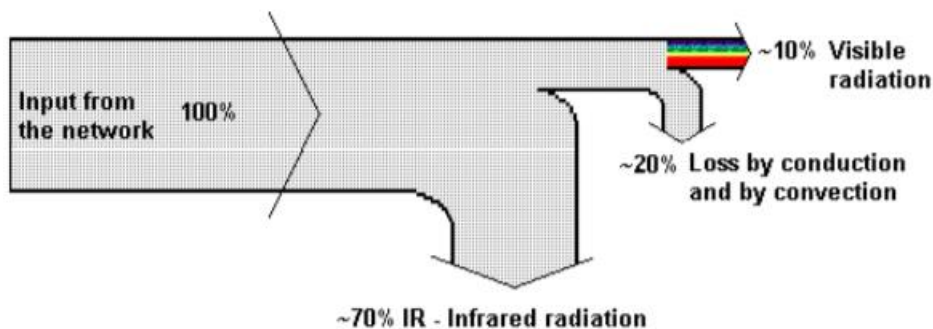


Figura 2.14: Partição da energia consumida por uma lâmpada incandescente [14]

As lâmpadas incandescentes normais têm ainda a desvantagem de ter um tempo de vida útil reduzido. Este factor ocorre devido à evaporação do tungsténio, levando à falha no filamento e consequente inutilização da lâmpada.

Face aos motivos apresentados e com a evolução do mercado, as lâmpadas incandescentes normais estão retiradas do mercado da UE desde 2012 e foram substituídas por algumas tecnologias mais viáveis a nível energético.

## **Lâmpadas de halogéneo**

Este tipo de fontes de luz pertence à família das lâmpadas incandescentes pois prosseguem o mesmo processo na geração de luz, ou seja, luz através do aquecimento de um filamento.

As lâmpadas de halogéneo contêm no seu interior um gás halogéneo, normalmente iodo, flúor ou bromo, que tem como finalidade capturar os átomos de tungsténio que se desprendem do filamento e transportá-los de volta para o mesmo. Esta aproximação ao filamento ocorre por convecção, sendo que o aumento da temperatura na lâmpada leva a que o tungsténio seja depositado no filamento e o halogéneo seja libertado para começar um novo ciclo. Este processo é designado de ciclo do halogéneo [6]. Este ciclo permite assim que o tempo de vida útil deste tipo de lâmpadas seja superior quando comparado com as lâmpadas incandescentes normais, visto que existe um menor desgaste do filamento.

Uma outra vantagem das lâmpadas halogéneas ocorre no facto de terem uma dimensão muito reduzida e de poderem operar a altas temperaturas pois o invólucro da lâmpada é constituído por quartzo, permitindo assim aumentar o seu fluxo luminoso e consequentemente obter uma eficiência luminosa superior até 45% comparativamente com as lâmpadas incandescentes normais [15].

Algumas lâmpadas halogéneas têm ainda um reflector incorporado que tem como função redireccionar o foco de luz por forma a que grande parte do fluxo luminoso incida numa superfície útil e permitir ainda que o calor emitido seja direccionado para a parte de trás da lâmpada.

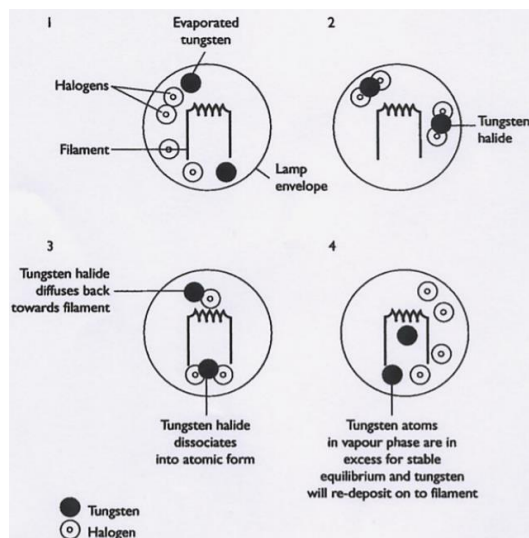


Figura 2.15: Ciclo do halogéneo [14]

### 2.2.2.2. Lâmpadas de Descarga

Ao contrário das lâmpadas incandescentes cujo processo necessário para gerar luz ocorre pela passagem de corrente que provoca o aquecimento de um filamento, as lâmpadas de descarga têm um princípio de funcionamento diferente. A geração de luz neste tipo de lâmpadas ocorre através da condução de corrente eléctrica num tubo que contém um gás e dois eléctrodos nos seus extremos.

Estas lâmpadas podem ser divididas em dois grupos dependendo do meio utilizado:

- Lâmpadas de descarga de alta pressão
- Lâmpadas de descarga de baixa pressão

#### Lâmpadas de Descarga de alta pressão

As lâmpadas de descarga de alta pressão, também denominadas HID, contêm um gás que é utilizado a uma pressão superior a 1 bar, que se encontra no interior de um tubo.

Inicialmente quando aplicada uma diferença de potencial suficiente aos eléctrodos, ocorre uma descarga eléctrica que conduz à excitação dos electrões e



resulta na ionização do gás presente no tubo de descarga, emitindo energia sob a forma de radiação visível [16].

Um problema nas HID decorre no facto de após começada uma descarga eléctrica o aumento de tensão provoca um efeito de avalanche na ionização do gás, conduzindo a um aumento significativo da corrente de operação. Desta forma para evitar a destruição da lâmpada é necessário um equipamento adicional que limita a corrente, o balastro [17].

Este tipo de lâmpadas tem como principais características um elevado tempo de vida útil e uma elevada eficiência luminosa, levando a que este tipo de lâmpadas sejam preferidas na indústria e iluminação exterior.

As lâmpadas HID existentes podem ser de três tipos: vapor de mercúrio, vapor de sódio e iodetos metálicos.

### **Lâmpada de vapor de mercúrio**

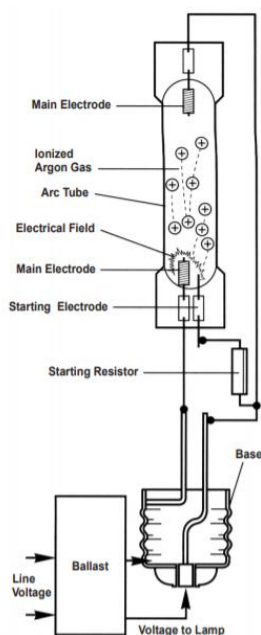
Numa fase inicial o vapor de mercúrio era o único gás utilizado como fonte principal de descarga nas HID, ao qual se adicionava uma pequena quantidade de outro gás inerte, geralmente árgon de maneira a facilitar o processo de vaporização necessário principalmente para o arranque da lâmpada.

A lâmpada de vapor de mercúrio é constituída por dois eléctrodos principais que se encontram nos extremos do tubo de descarga e um outro eléctrodo auxiliar a fim de ajudar no arranque da lâmpada.

Quando ocorre a descarga inicial da lâmpada é criado um arco eléctrico entre o eléctrodo auxiliar e um eléctrodo principal, causando a emissão de electrões necessária para ionizar o gás no tubo de descarga. A ionização do gás cria um arco de partículas entre os dois eléctrodos principais, sendo que quando existem partículas suficientes no arco a resistência encontrada no tubo baixa, resultando no aumento de corrente na lâmpada [4], [17]. A luz é assim produzida através da colisão entre os electrões e as partículas de gás, resultando na libertação de energia visível.

Uma outra característica deste tipo de lâmpadas decorre no facto de que o aumento contínuo da corrente torna a lâmpada mais quente e caso o seu circuito

de alimentação seja interrompido, esta tem de permanecer alguns minutos desligada antes de poder retomar a operação.



**Figura 2.16: Princípio de funcionamento da lâmpada de vapor de mercúrio [17]**

A eficiência luminosa deste tipo de lâmpadas é moderada, entre 40 e 60 lm/W, com o seu tempo de vida útil a rondar as 15000 horas e o baixo preço de aquisição comparativamente com outras lâmpadas HID leva a que tenham um grande potencial preferencialmente no sector da indústria, apesar de o seu IRC ser inferior a 60% [14].

### **Lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão**

Esta tipo de lâmpadas são denominadas de VSAP e têm um processo de geração de luz semelhante às lâmpadas de vapor de mercúrio, com a pequena particularidade de o seu processo de ignição inicial ocorrer de forma ligeiramente diferente. Estas lâmpadas são constituídas por dois eléctrodos principais e o gás presente é um composto de sódio, mercúrio e xénon, sendo que como o tubo de descarga é muito estreito não existe o eléctrodo auxiliar de ignição [17]. Visto que este tipo de lâmpadas não tem eléctrodo auxiliar, é necessário um dispositivo adicional, denominado arrancador, para que se forneça um pico de tensão inicial necessário para ionizar o gás presente no tubo de descarga.

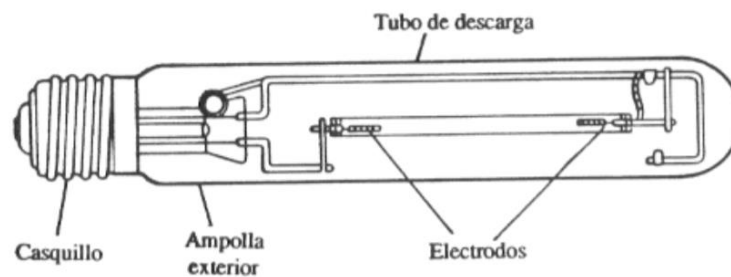


Figura 2.17: Lâmpada de vapor de sódio de alta pressão [14]

As lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão apresentam uma radiação emitida de cor amarelada, causando um melhor conforto visual quando comparando com as lâmpadas de vapor de mercúrio. Em termos de eficiência luminosa apresenta um elevado rendimento, cerca de 120 lm/W e a sua capacidade de restituição de cor varia de 45 a 70% [16].

Uma outra característica é o longo tempo de vida útil da lâmpada que pode chegar às 25000 horas. No entanto, por cada 1000 horas de utilização a tensão de operação da lâmpada aumenta 1 a 2 Volts, resultando numa maior dificuldade no processo de ignição da lâmpada [12].

### Lâmpadas de iodetos metálicos

As lâmpadas de iodetos metálicos são um desenvolvimento das lâmpadas de vapor de mercúrio e por esse motivo numa fase inicial o seu processo de funcionamento era semelhante, com a excepção de ser utilizado uma mistura de iodetos metálicos, índio e mercúrio no interior do tubo de descarga.

Em comparação com as lâmpadas de vapor de mercúrio foi possível melhorar o IRC e a eficiência luminosa da lâmpada. No entanto, com alguns estudos técnicos realizados ao longo dos anos permitiram alterar a sua estrutura para ser semelhante às lâmpadas de vapor de sódio, onde só contamos com dois eléctrodos no tubo de descarga. Essas alterações permitiram assim aumentar o tempo de vida útil da lâmpada, melhorar o IRC e melhorar o tempo de arranque da lâmpada [18].

O seu custo de aquisição é uma das suas principais desvantagens, sendo utilizada sobretudo na iluminação exterior nomeadamente projectores, campos desportivos e iluminação pública.

## **Lâmpadas de Descarga de baixa pressão**

As lâmpadas de descarga de baixa pressão têm um serviço operacional semelhante às HID, no entanto o gás presente no tubo de descarga é utilizado a uma pressão inferior a 1 bar.

À semelhança das HID as lâmpadas de descarga de baixa pressão também necessitam de balastro por forma a fornecerem as condições necessárias para a manutenção da operação da lâmpada.

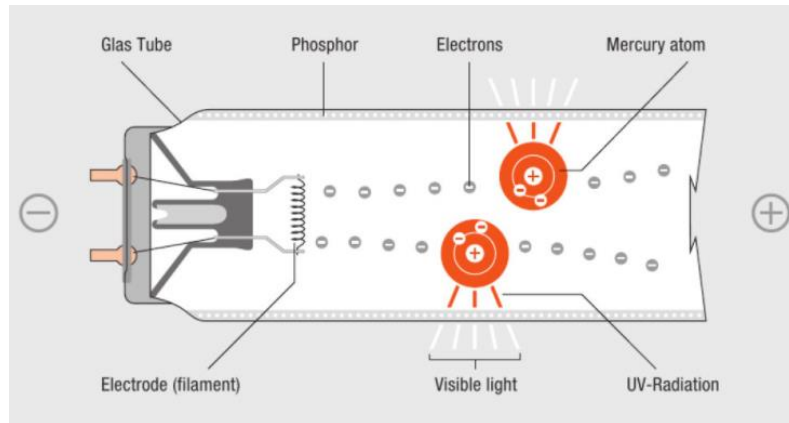
As lâmpadas de descarga de baixa pressão mais comuns no mercado são as lâmpadas fluorescentes lineares devido às suas boas características, versatilidade e grande variedade de escolha que proporcionam uma grande economia sem afectar a qualidade da iluminação, com a sua utilização mais comum em escritórios, escolas, comércio e uso residencial.

Actualmente as lâmpadas de descarga de baixa pressão encontradas são de dois tipos: fluorescentes lineares e fluorescentes compactas.

### **Lâmpadas fluorescentes lineares**

As lâmpadas fluorescentes lineares, denominada de LFL, são uma fonte de descarga que contêm um gás a baixa pressão, no qual a luz é gerada através da colisão de electrões com os átomos de gás. A sua constituição inclui dois eléctrodos de fio de tungsténio com um material emissor de electrões e o interior do tubo é preenchido com gases inertes, normalmente árgon, e uma pequena quantidade de mercúrio.

O processo de arranque da lâmpada ocorre com a ajuda de um arrancador que fornece a corrente necessária para causar o aquecimento do filamento que vai provocar a libertação de electrões. Os electrões vão então criar um arco dentro do tubo de descarga acabando estes por colidir com as partículas de gás, no qual será libertado energia sob a forma de fotões pertencente à região ultra violeta do espectro. Adicionalmente a região da parede do vidro do tubo é revestida com uma substância fluorescente de maneira a transformar a radiação ultra violeta em radiação visível [4], [19].



**Figura 2.18: Operação de uma lâmpada fluorescente linear [20]**

As diferentes LFL são conhecidas por possuírem diversos tamanhos, temperaturas de cor e IRC elevados, boa eficiência luminosa e um longo tempo de vida útil, fazendo destas lâmpadas ideais para permitir criar vários cenários de iluminação.

Actualmente os tipos de LFL mais comercializadas são: T5, T8, T12. A letra T indica que são de forma tubular, enquanto a numeração indica o tamanho do seu diâmetro. As lâmpadas T12 pertencem à geração mais antiga no qual a produção de luz era gerada através de processos de indução electromagnética e portanto são mais ineficientes. As lâmpadas T5 e T8 são uma tecnologia mais recente e como tal têm circuitos electrónicos na sua composição. Uma das vantagens das T5 consiste no facto de serem 40% mais pequenas que as T8 conseguindo assim gerar maior qualidade de luz, no entanto o seu custo de aquisição também é ligeiramente mais elevado [21].



**Figura 2.19: Tipos de lâmpada fluorescente linear [22]**

As lâmpadas T8 são as mais vendidas comparando com os outros tipos de LFL, pois a sua relação qualidade-preço faz destas a melhor escolha, sendo aplicadas sobretudo ao comércio e edifícios empresariais.

## Lâmpadas fluorescentes compactas

As lâmpadas fluorescentes compactas, denominadas CFL, têm um funcionamento muito semelhante às lâmpadas fluorescentes tubulares, no entanto o seu pequeno porte origina a que a sua instalação e transporte seja ligeiramente mais fácil. As vantagens deste tipo de lâmpadas decorre no facto da sua longa duração de vida e consumo muito reduzido, tornando assim as CFL's ideais para competir com as lâmpadas incandescente e halogéneas, visto que conseguem melhorar a eficiência da lâmpada até 50% [14], [19].

As CFL's são constituídas por um tubo de descarga curvo ou vários tubos de descarga de menor dimensão, sendo representadas pelos seguintes tipos: CFL's integradas, no qual os componentes necessários para o funcionamento da lâmpada já se encontram nesta e CFL's não integradas, onde os acessórios para o correcto funcionamento da lâmpada são externos, possibilitando a reutilização do material mesmo depois do final do tempo de vida útil da lâmpada. [14].

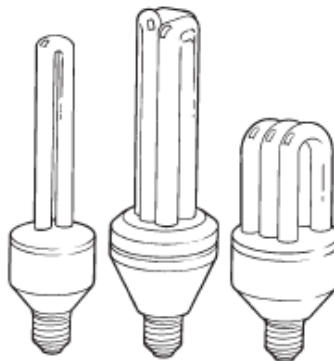


Figura 2.20: Lâmpadas fluorescentes compactas [15]

### 2.2.2.3. Lâmpadas de Indução

As lâmpadas de indução electromagnética são fontes de iluminação que geram luz sem recurso a eléctrodos ou filamentos, resultando assim no aumento do tempo de vida útil da lâmpada, visto que os eléctrodos são um dos constituintes mais vulneráveis que levam à falha das lâmpadas.

Este tipo de lâmpadas é constituído por um tubo de descarga circular contendo mercúrio e um gás nobre, normalmente árgon. Adicionalmente são precisos dois anéis magnéticos com bobinas, necessários para criar um campo

electromagnético no tubo de descarga. Este campo electromagnético vai provocar a ionização do gás presente no tubo que conduz à libertação de energia sob a forma de radiação ultravioleta, sendo esta convertida através de uma substância fluorescente para radiação visível [4], [23].

O processo de arranque da descarga na lâmpada ocorre com recurso a um gerador de alta frequência (2,65 MHz).

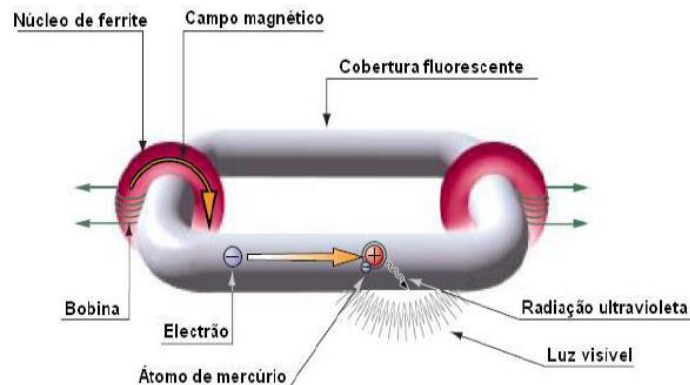


Figura 2.21: Operação de uma lâmpada de indução [23]

As principais vantagens das lâmpadas de indução são: longo tempo de vida, até 100000 horas, bom IRC, eficiência luminosa varia de 60 a 80 lm/W, custo de manutenção muito reduzidos sendo ideal para locais de difícil acesso e possui um tempo de arranque e reacendimento da luz quase instantâneo.

#### 2.2.2.4. Lâmpadas LED

Os diodos emissores de luz, denominados de LED, são uma tecnologia que contribuiu para a evolução do mercado da iluminação devido à sua capacidade de produzir uma grande luminosidade com um consumo energético baixo. O baixo consumo energético da tecnologia LED deriva no facto de estas emitirem grande parte da sua radiação na zona visível, levando a um rendimento útil elevado e perdas reduzidas.

Contrariamente às lâmpadas incandescentes cujo processo de produção de luz ocorre através do aquecimento do filamento ou nas lâmpadas de descarga devido ao aquecimento de um gás, os LED's convertem a energia eléctrica em energia luminosa no próprio material semicondutor, sendo então chamada de iluminação em estado sólido. Neste caso os LED's geram luz através do

fenómeno conhecido como electroluminescência, que através de uma corrente aplicada a um material semiconductor proporciona que os electrões se desloquem através da junção P-N. Esta junção contém um maior número de buracos no lado P, resultado da ausência de electrões, e um excesso de electrões no lado N. A emissão de luz ocorre quando os electrões e os buracos se deslocam na direcção da junção P-N, re combinando-se e passando para um nível de energia inferior sendo a energia em excesso libertada sob a forma de radiação visível. Os diversos comprimentos de onda da radiação electromagnética emitidos variam consoante o tipo de material semiconductor utilizado, assim como a quantidade de luz emitida vai ser afectada pelo aumento da corrente [4], [24].

Adicionalmente as lâmpadas LED não podem ser ligadas directamente à rede eléctrica visto que as tensões e correntes fornecidas não são as correctas para o seu funcionamento. Desta forma é necessário um *driver*, este é um componente electrónico auxiliar que permite converter a tensão alternada em contínua e estabilizar a tensão independentemente de variações futuras.

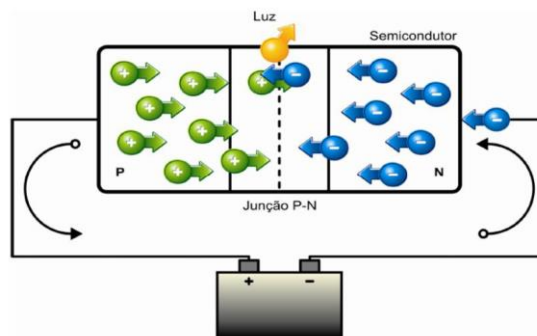


Figura 2.22: Funcionamento de um LED [23]

A tecnologia LED é a tecnologia mais moderna e a sua utilização é adequada aos diversos projectos de iluminação devido às inúmeras vantagens que esta tem. Esta tecnologia possui uma grande versatilidade podendo assim competir com todos os tipos de lâmpadas, tem um tempo de vida útil que pode chegar às 50000 horas e tem um IRC elevado, variando de 60 até 90% [24].

Todas estas características fazem que cada vez mais empresas estejam a re-dimensionar o seu sistema de iluminação, sendo que a sua grande eficiência energética associado ao seu baixo consumo resulta no corte drástico da factura de energia eléctrica.



Apesar de todas as vantagens descritas esta tecnologia tem um custo de aquisição ainda elevado, no entanto o seu elevado tempo de vida útil e a sua baixa necessidade de manutenção tornam viável e vantajosa a sua compra em grande parte dos projectos luminotécnicos.

### 2.2.2.5. Comparação dos diversos tipos de lâmpadas

Analisando as lâmpadas descritas anteriormente foi possível reunir algumas das suas características com objectivo de comparar e de escolher as fontes com especificações mais adequadas.

**Tabela 2.2: Características dos diversos tipos de lâmpadas [6], [15], [23]**

Família	Tipo de Lâmpada	Eficiência Luminosa (lm/W)	Vida Útil (horas)	Temp. de cor (K)	IRC (%)	Equipamento Auxiliar
Lâmpadas incandescentes	Convencionais	5 a 20	Até 1000	2600 a 3000	100	Não
	Halogéneo	10 a 25	Até 4000	2800 a 3200	100	Não
Lâmpadas de Descarga de Alta Pressão	Vapor de Mercúrio	40 a 60	Até 15000	3400 a 4200	<60	Balastro
	Vapor de Sódio	60 a 120	Até 25000	2000 a 2500	<70	Balastro e ar-rancador
	Iodetos Metálicos	68 a 95	Até 9000	3000 a 5600	90	Balastro e ar-rancador
Lâmpadas de Descarga de Baixa Pressão	Fluorescente Tubular	60 a 100	Até 8000	2700 a 6500	<90	Balastro e Ar-rancador
	Fluorescente Compacta	30 a 85	Até 8000	2700 a 6000	80	Balastro e Ar-rancador
Lâmpadas de Indução	-	60 a 80	Até 100000	2700 a 4000	80	Gerador de alta frequência
Lâmpadas LED	-	Até 130	Até 50000	3000 a 8000	<90	Driver

Conforme se pode observar na Tabela 2.2, a família das lâmpadas incandescentes apresenta um fraco rendimento luminoso resultando na proibição da sua distribuição e comercialização, levando que a sua procura seja quase inexistente. Por sua vez as lâmpadas de descarga apresentam elevados rendimentos luminosos e um longo tempo de vida útil, tornando este tipo de lâmpadas as mais representadas no mercado.

Porém com a evolução do mercado da iluminação surgem tecnologias mais económicas a longo prazo e com capacidade de competir com todas as outras famílias de lâmpadas, como é o caso da tecnologia LED que se tornou mais popular, resultando na troca imediata do sistema de iluminação dos utilizadores para tecnologias deste tipo.

A escolha de uma fonte de luz deve ser adequada ao tipo de sector a que se destina. Por esse motivo o utilizador deve ter em consideração aspectos como o fluxo luminoso, rendimento e temperatura de cor da lâmpada no momento de aquisição desta.

### **2.2.3. Dispositivos Auxiliares**

Os dispositivos auxiliares são pequenos componentes instalados no interior ou exterior das lâmpadas com objectivo de garantir o correcto funcionamento e estabilização durante o seu processo de operação.

#### **2.2.3.1. Arrancadores**

Os arrancadores são dispositivos colocados sobretudo nas lâmpadas de descarga e consistem numa ampola contendo uma mistura de gases inertes com hidrogénio a baixa pressão. No interior da ampola estão presentes dois eléctrodos de materiais diferentes, que com o aumento da temperatura expandem e pressionam um no outro.

Inicialmente ao aplicar uma tensão, a temperatura no interior da ampola vai aumentar, levando a que os eléctrodos se dobrem e que exista contacto entre eles. Este contacto origina uma variação de corrente, resultando na interrupção da

descarga inicial nas extremidades da lâmpada e consequentemente origina um pico de corrente necessário para iniciar o arranque da lâmpada [25].

Quando os eléctrodos no arrancador contactam o circuito é imediatamente interrompido e a diminuição da temperatura retorna os eléctrodos à posição inicial.

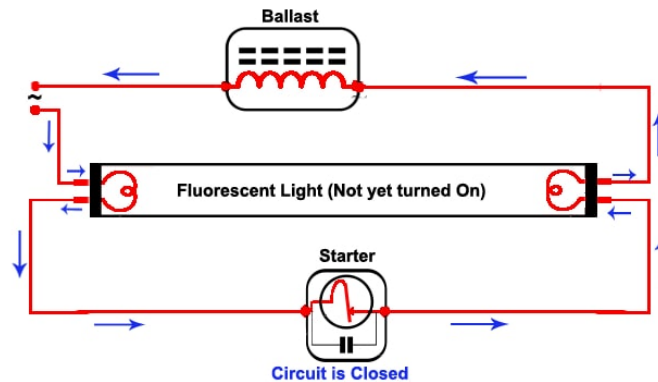


Figura 2.23: Circuito da lâmpada com recurso a arrancador [26]

O arrancador pode ser comparado a um interruptor que ao aplicar uma tensão inicial vai pré-aquecer o circuito e fornecer o impulso necessário para o arranque da lâmpada, sendo que quando a lâmpada está em funcionamento normal o arrancador deixa de ser incluído.

### 2.2.3.2. Drivers

Os *Drivers* são dispositivos internos nas lâmpadas LED, sendo necessários porque a rede eléctrica não fornece uma tensão apropriada para a ligação directa com este tipo de lâmpadas. Assim um *driver* é uma fonte de alimentação electrónica com o objectivo de converter tensão alternada em contínua, transformando a tensão da rede para níveis operacionais uma vez que os LED's foram desenvolvidos para trabalhar a baixa tensão.

Estes dispositivos têm mecanismos capaz de proteger a lâmpada contra possíveis curto-circuitos e estabilizar a tensão de saída independentemente de eventuais flutuações na entrada, por forma a que uma variação não afecte a corrente fornecida à lâmpada e consequentemente uma alteração na quantidade de luz gerada [24].

### **2.2.3.3. Balastros**

Os balastros são dispositivos aplicados principalmente às lâmpadas de descarga e têm como objectivo limitar a corrente de funcionamento da lâmpada. Adicionalmente os balastros garantem uma tensão adequada para o funcionamento da lâmpada, cumprindo a função de elevar a tensão de arranque garantindo a descarga inicial e de pré-aquecerem os eléctrodos de maneira a facilitar o processo de emissão de electrões.

Os balastros são elementos importantes na aplicação de um projecto luminotécnico, visto que garantem um desempenho ideal da lâmpada assim como permitem poupanças caso a sua aplicação seja correcta.

Os balastros podem ser de dois tipos: electromagnéticos ou electrónicos.

#### **Balastros Electromagnéticos**

Os balastros electromagnéticos são constituídos por um núcleo laminado de aço silício envolvido em várias espiras de fio de cobre. Devido à presença de bobines, o circuito tem um carácter indutivo contribuindo deste modo para a diminuição do factor de potência, pelo que é necessário adicionar condensadores para diminuir esse efeito.

Adicionalmente as perdas energéticas deste tipo de balastros são muito elevadas principalmente devido a perdas de Joule, resultante do aquecimento do fio de cobre e a perdas magnéticas no núcleo (histerese e Foucault) que originam um maior consumo por parte da lâmpada [12].

A vantagem associada a este balastro prende-se no seu baixo custo de aquisição e simplicidade de circuito. No entanto algumas características como as suas dimensões, peso, fraco rendimento e baixo factor de potência acabam por tornar mais atractiva e económica a longo prazo a escolha de outro tipo de balastros.

Os balastros electromagnéticos podem ainda ser classificados nas seguintes classes energéticas: D (perdas elevadas), C (perdas convencionais) e B (perdas reduzidas).

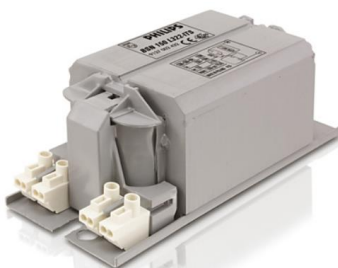


Figura 2.24: Balastro electromagnético [27]

## Balastros Electrónicos

Os balastros electrónicos são uma tecnologia mais moderna que é constituída por circuitos integrados e outros componentes electrónicos, garantindo um funcionamento rápido da lâmpada.

Estes balastros têm a particularidade de conseguirem converter a frequência da rede, 50 Hz, para altas frequências, 20-100kHz, gerando desta forma a mesma quantidade de luz com um menor consumo da lâmpada, permitindo assim aumentar a eficiência energética do sistema de iluminação até 12% [28].

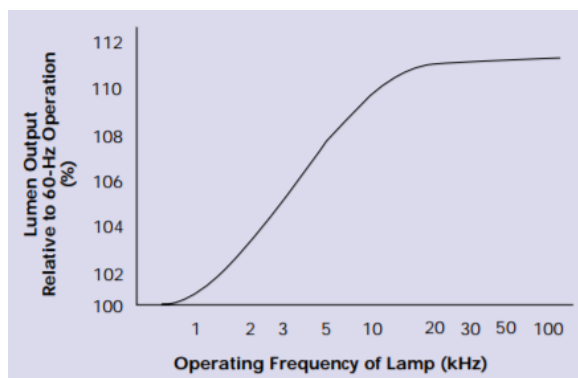


Figura 2.25: Eficiência da lâmpada com variação da frequência [28]

A utilização de balastros electrónicos comparativamente a balastros electromagnéticos têm inúmeras vantagens, como por exemplo: permite obter uma poupança de energia até 30%, maior rendimento luminoso, os componentes electrónicos permitem reduzir as perdas do balastro, tem um elevado factor de potência e têm um funcionamento silencioso [12].

Os balastros electrónicos podem ser classificados nas seguintes classes de energia: A3 (perdas convencionais), A2 (perdas reduzidas) e A1 (balastros com regulação de fluxo).



Figura 2.26: Balastro electrónico [27]

## 2.3.Luminárias

Uma luminária é um equipamento capaz de produzir, controlar e distribuir a luz. Esta é constituída por uma ou mais fontes de luz, que consoante o tipo de luminária poderá adicionalmente possuir um reflector para ajudar a distribuir a luz.

Todas as luminárias devem de garantir que a luz é distribuída para as superfícies correctas, evitando assim encandeamento e gerando um conforto visual. Estas devem ainda possuir suportes a fim de proteger todos os equipamentos eléctricos da lâmpada de forma a garantirem a segurança dos utilizadores.

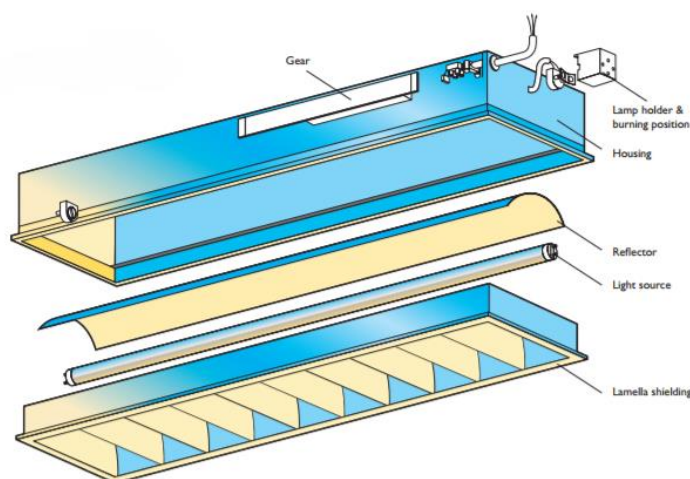


Figura 2.27: Constituição de uma luminária [6]

### 2.3.1. Tipos de Luminárias

Existem vários tipos de luminárias aplicadas a diversos tipos de locais, contendo uma ou mais fontes de luz. Os tipos de luminárias mais comuns no mercado são os seguintes:

#### Campânulas

As campânulas pertencem às luminárias suspensas com a sua montagem a ocorrer em locais superiores a 6 metros. Apresentam baixos custos de manutenção e são luminárias com um design que permite dissipar facilmente o calor derivado da grande potência eléctrica das fontes de luz. Esta luminária utiliza reflectores metálicos de maneira a direccionar a luz com melhor eficácia. As lâmpadas mais comuns de encontrar em campânulas são lâmpadas de descarga a alta pressão, pois estas apresentam um elevado fluxo luminoso e um excelente rendimento luminoso. As campânulas são utilizadas preferencialmente em pavilhões, naves industriais e armazéns.



Figura 2.28: Campânula [29]

#### Painéis

Os painéis são luminárias que se podem encontrar encastradas ou salientes e o seu formato rectangular e quadrado leva a que estas possam ser adaptadas a diversos ambientes. Por norma os painéis são luminárias robustas onde são aplicadas lâmpadas fluorescentes lineares, sendo montadas em alturas inferiores a 6

metros. Os painéis são aplicados geralmente em escritórios, escolas, estabelecimentos comerciais, entre outros.



Figura 2.29: Painel rectangular [29]

## Downlights

Os downlights são luminárias tipicamente encastradas de baixo consumo energético, que utilizam por norma lâmpadas de halogéneo ou fluorescente compactas. A luminária é constituída por um invólucro em alumínio com uma ou mais fontes de luz que podem ser fixas ou direccionáveis. Este tipo de luminárias tem a particularidade de grande parte do fluxo emitido pela lâmpada ser direccionado para uma superfície, não existindo assim muitas perdas de fluxo para locais indesejados.

O pequeno porte deste tipo de luminárias resulta num ambiente mais limpo e aberto. Os downlights são utilizados sobretudo em halls, montras e showrooms.



Figura 2.30: Downlight [29]



## Estanques

As estanques são luminárias salientes que utilizam lâmpadas fluorescentes tubulares e têm na sua constituição um difusor por norma, sendo este construído em policarbonato. As fontes de luz estão protegidas pelo difusor e existe ainda a possibilidade de fortificar o corpo da luminária.

Este tipo de luminárias é utilizado em ambientes com condições adversas, que estão sujeitos a risco de incêndio ou explosão, e em locais húmidos ou com elevada poeira. Face aos locais onde são utilizadas, as luminárias estanques apresentam um elevado índice de protecção e de resistência.



Figura 2.31: Luminária estanque [29]

## Projectores

Os projectores são luminárias aplicadas ao exterior, apresentando um grande ângulo de abertura, sendo que utilizam lâmpadas de descarga de alta pressão devido ao seu elevado fluxo luminoso. Devido à grande potência eléctrica das lâmpadas a luminária deve possuir um dissipador de calor para garantir a sua correcta utilização.

Devido ao elevado foco de luz produzido nos projectores, estes são ideias para iluminar fachadas, pilares, outdoors, entre outras aplicações.



Figura 2.32: Projector [29]

### 2.3.2. Classificação fotométrica

As luminárias têm diversos parâmetros que avaliam o seu desempenho como por exemplo a performance mecânica, eléctrica e a fotométrica. O desempenho fotométrico de uma luminária indica a eficácia da distribuição luminosa por parte da luminária.

Como a luminosidade dentro da luminária não se distribui uniformemente, os fabricantes disponibilizam alguns dados fotométricos que indicam a intensidade da luz segundo um certo ângulo de abertura, afim de o utilizador obter o máximo rendimento por parte da luminária para que a distribuição luminosa esteja de acordo com os seus interesses.

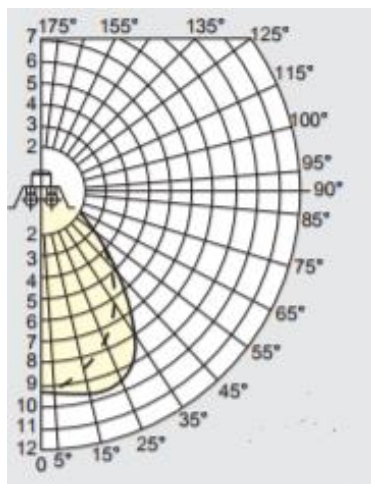


Figura 2.33: Curva de distribuição de uma luminária [5]

Conforme se pode observar através da Figura 2.33, a curva de distribuição indica a intensidade luminosa, representada no eixo mais à esquerda, de uma certa luminária em todos os ângulos. Através deste tipo de diagramas consegue-se observar a distribuição luminosa no plano transversal e longitudinal, de forma a que se perceba qual a escolha da melhor luminária para um determinado espaço, sendo que a mudança de reflectores ou difusores provocam alterações nas curvas fotométricas

### 2.3.3. Sistemas de controlo

Os sistemas de controlo são dispositivos que têm um papel importante na gestão da energia, nomeadamente no controlo dos sistemas de iluminação. Com o decorrer do tempo as fontes de luz têm evoluído no sentido de se tornarem mais

eficientes, sendo necessário recorrer a sistemas que controlam a iluminação de forma a otimizar a sua utilização permitindo assim minimizar o seu consumo e garantindo uma poupança energética.

Desta forma recorre-se a sistemas de controlo de maneira a depender menos do comportamento humano e aproveitar melhor os recursos como a luz natural, tornando os sistemas mais competentes.

#### **2.3.3.1. Interruptor On/Off**

O interruptor On/Off, também chamado de sistema manual, é o sistema de controlo mais utilizado sendo colocado por norma à entrada do espaço. Este sistema de controlo tem apenas dois níveis disponíveis, ligado e desligado, de forma a que cada interruptor controle um grupo de luminárias para fornecer uma correcta distribuição localizada da iluminação.

Este tipo de sistema tem a vantagem de apresentar uma utilização simples e de permitir vários pontos de controlo. O seu baixo custo de aquisição torna-o na solução mais escolhida para a grande maioria dos locais, sendo ideal para espaços onde a utilização da iluminação é constante, estando dependente do bom senso dos utilizadores. Desta forma é um sistema pouco eficiente face aos desperdícios energéticos e grande nível de dependência do utilizador.

#### **2.3.3.2. Temporizadores**

Os temporizadores, também chamados de interruptores horários, são sistemas que permitem o controlo dos circuitos de iluminação mediante um horário pré-definido, que por sua vez deve coincidir com o horário de utilização do local. Estes dispositivos podem ser analógicos ou digitais, existindo a possibilidade de guardar o programa em memória, com 1 ou múltiplos canais, podendo controlar mais do que um circuito [4].

Este tipo de sistema de controlo deve ter a capacidade de *override*, por forma a serem utilizados fora do horário pré-definido do temporizador. Os interruptores horários são utilizados sobretudo em espaços exteriores e em algumas indústrias e zonas comerciais, perfazendo estes uma forma eficiente e conveniente de controlo da iluminação.

### 2.3.3.3. Sensores de presença

Este tipo de sistema de controlo liga o sistema de iluminação em resposta da presença de ocupantes na zona instalada. Este sensor detecta o movimento e desta maneira liga as luzes aquando o local se encontra ocupado, sendo que posteriormente o sistema é desligado quando o mesmo não detecta movimento no espaço.

A grande maioria das actividades é detectada, no entanto actividades com menos movimento como leitura ou escrita podem não ser detectadas, sendo que a escolha do sensor a instalar é um factor a ter em consideração.

Os sensores utilizados podem conter algumas tecnologias para detectar os ocupantes no local, estes podem ser:

#### Infravermelhos passivos

Os sensores infravermelhos, também denominados PIR, detectam a presença de radiação, nomeadamente o calor emitido pelo corpos que se encontram em movimento. Este tipo de sensores detectam movimentos a grandes distâncias e são utilizados sobretudo em grandes áreas, podendo ser predispostos na parede e no teto, sendo sempre necessário ter o alcance da área a controlar.

#### Ultra-sónicos

Os sensores ultra-sónicos emitem um sinal a alta frequência e recebem informações relativas à reflexão desse sinal por forma a conseguirem ter a percepção se o espaço está a ser ocupado através do movimento dos utilizadores. Este tipo de sensor é maioritariamente utilizado em espaços pequenos visto que detecta melhor os pequenos movimentos [4].

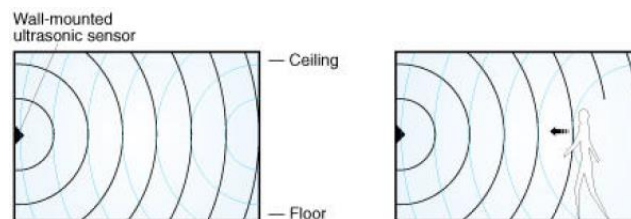


Figura 2.34: Exemplo de funcionamento do sensor ultra-sónico [4]

Como se pode observar, a escolha do tipo de sensor a instalar constitui uma escolha relevante na procura pela eficiência energética e na redução da factura energética. Desta forma a utilização das luminárias nas horas "mortas" é reduzida e o bem estar dos ocupantes não é afectado.

#### 2.3.3.4. Sensores Crepusculares

Os sensores crepusculares são sistemas que através de uma célula fotoelétrica mede os níveis de luminosidade do local. Este sistema é activado quando a iluminação do local não é suficiente para iluminar o espaço.

A célula fotoelétrica presente no sensor vai reagir aos diversos níveis de luminosidade, ligando ou desligando o circuito de iluminação. Cada célula fotoelétrica pode controlar um circuito de iluminação ou controlar uma luminária individualmente, sendo que neste último caso a célula é integrada como parte da luminária [4].

A grande aplicação deste tipo de sensores destina-se à iluminação pública onde funciona de forma eficiente, permitindo comparativamente aos temporizadores um melhor aproveitamento da iluminação natural pelo facto de as condições climáticas variarem constantemente e o seu horário de funcionamento mudar regularmente.



Figura 2.35: Interruptor crepuscular [30]

### 2.3.3.5. Dimming

Os sistemas de *dimming* permitem a regulação de fluxo em conjunto com a iluminação natural para um nível desejado. Este sistema permite medir o nível de luminosidade do local através de uma célula fotoelétrica, sendo que o fluxo desejado no local é regulado para um valor pretendido pelo utilizador de forma a assegurar que em conjunto com a iluminação natural a luminosidade do local é mantida [4].

O controlo efectuado por *dimming* é eficaz pois os valores de luminosidade num local não são constantes ao longo do dia, podendo este sistema otimizar a luminosidade adequada a cada local, resultando assim numa poupança energética sem afectar o conforto dos utilizadores.

O *dimming* tem a particularidade de afectar o fluxo de saída, o tempo de vida e a temperatura de cor das lâmpadas, tendo também a desvantagem de o seu custo de aquisição ser mais elevado do que os outros sistemas de controlo.

## 2.4. Simuladores para optimização

O processo de simulação computacional é uma forma de garantir que se observa os possíveis impactos no espaço antes de proceder à instalação, permitindo apresentar os cálculos e os seus resultados com grande precisão. A simulação computacional é também um processo que permite auxiliar os técnicos no terreno visto que o tempo para obtenção de resultados é relativamente pequeno, sendo a aposta de cada vez mais empresas.

Os sistemas de iluminação são uma oportunidade para a optimização energética através da promoção de medidas que tornam possíveis a redução dos custos da factura energética sem comprometer os utilizadores. De forma a mostrar os resultados de uma possível optimização dos sistemas de iluminação, os simuladores são as ferramentas que consideram todas as medidas aplicadas.

### 2.4.1. Identificação de medidas

Os simuladores permitem implementar várias medidas e observar os possíveis resultados que advêm do mesmo. No caso da iluminação essas medidas passam pelo aumento da eficiência energética, que pode ser garantida através de propostas como o retrofit de lâmpadas, instalação de sistemas de controlo mais eficientes, substituição de balastros, substituição de luminárias, entre outros.

As medidas mais populares para otimizar os sistemas de iluminação são através da substituição e do retrofit.

A substituição permite aumentar a eficiência energética através da troca integral da luminária, que inclui o corpo da luminária, dispositivos auxiliares e lâmpadas. A troca pode ocorrer devido ao estado de degradação da luminária ou devido à luminária actual não ser adequada para o local, sendo que a variedade na escolha das novas luminárias garante uma iluminação correcta, permitindo redireccionar o fluxo e aumentam as poupanças inerentes à manutenção, sendo assegurado um aumento da eficiência energética do sistema.

Outra maneira de otimizar o sistema de iluminação é por intermédio do retrofit. O retrofit permite uma redução da factura energética através da substituição das lâmpadas por tecnologias mais eficientes. Como no retrofit apenas são substituídas as fontes de luz, o investimento inicial é inferior comparativamente com a substituição e como a distribuição luminosa é uma característica das luminárias, garantimos que o local a actuar tem a mesma distribuição de fluxo.

Por forma a otimizar os sistemas de iluminação deve-se garantir que a qualidade da iluminação não é inferior ao sistema actual, caso contrário a medida proposta não é correcta afim de por em causa o espaço e os seus utilizadores.

As medidas para otimizar os sistemas de iluminação devem ainda considerar os custos inerentes à instalação e manutenção das luminárias, de forma que o *payback* por parte do cliente seja viável e que as poupanças resultantes da redução da factura energética permitam ultrapassar o investimento inicial, sendo que normalmente em projectos de iluminação são esperados períodos de retorno de investimento inferiores a 5 anos.

### 2.4.2. Simuladores no mercado

Actualmente devido às grandes poupanças apresentadas pela optimização dos sistemas de iluminação, as empresas apostam em áreas para os clientes simularem os seus sistemas de iluminação. De seguida vamos analisar alguns simuladores direccionados para empresas, assim como as suas principais características.

#### Simulador Ledvance

O simulador Ledvance calcula a energia, custos de aquisição e o período de retorno relativamente à substituição de luminárias. Este simulador permite escolher o tipo de luminária a substituir e a sua potência, apresentando uma alternativa com um menor consumo e maior eficiência energética. No relatório gerado é apresentada uma comparação entre custos do produto, tempo de vida útil, potência nominal e emissões de  $CO_2$  entre a tecnologia actual e a tecnologia proposta.

As desvantagens deste simulador são as pequenas quantidades do tipo de luminárias que o utilizador pode escolher, não considerar a medida de retrofit e adicionalmente o utilizador só pode testar um tipo de luminárias por cada simulação, sendo que não inclui a utilização dos sistemas de controlo para cálculos mais exactos.

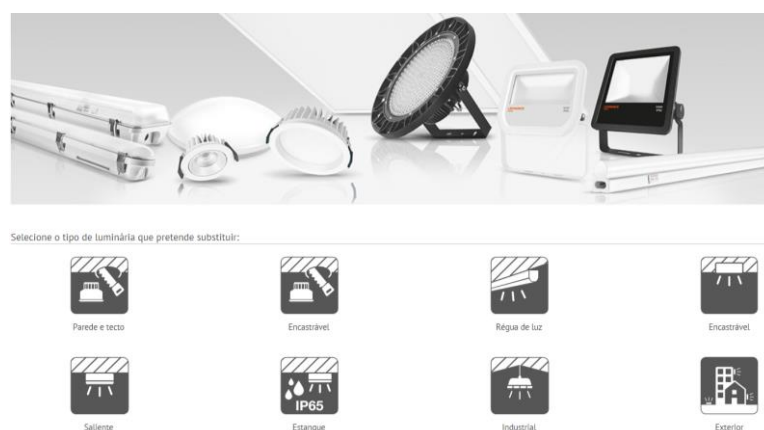


Figura 2.36: Simulador de iluminação Ledvance [31]



## Simulador Philips

O simulador Philips permite calcular a poupança com um upgrade do sistema de iluminação. Semelhante ao simulador Ledvance, este simulador permite calcular a poupança energética aconselhando tecnologias mais eficientes e de menor consumo energético. Escolhendo uma área de aplicação e a instalação de referência, é gerado um relatório onde são apresentados o custo de aquisição, tempo de vida útil, economia de energia e período de retorno de investimento das alternativas à tecnologia actual.

Este simulador tem como desvantagem a pequena gama de lâmpadas que o utilizador pode escolher no processo de simulação, apenas apresenta soluções de retrofit e a inconveniência de realizar várias simulações caso se pretenda estudar o comportamento para diversas zonas ou áreas com mais do que um tipo de lâmpadas.



Figura 2.37: Simulador de iluminação Philips [32]

## Simulador Current

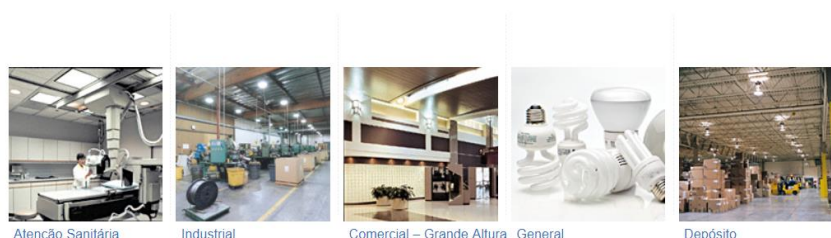
O simulador Current relativo à iluminação está dividido em vários módulos, sendo que os mais importantes estão relacionados com a substituição de luminárias e com o impacto energético e ambiental. A parte relacionada com a substituição de luminárias indica a quantidade de novos equipamentos necessários para manter o nível de iluminância actual, assim como indica uma comparação dos lumens médios entre a lâmpada actual e o novo equipamento. A parte alusiva ao impacto energético e ambiente permite ao utilizador numa fase inicial escolher qual o tipo de sector da sua instalação e seguidamente este deve preencher informações relacionadas com a sua área, tarifa energética e escolha de duas

soluções de forma a ser apresentado um relatório com dados relativos à energia utilizada e energia economizada, assim como todos os benefícios ambientais.

Este simulador apresenta assim um bom relatório a nível da comparação de soluções, permitindo ao utilizador observar de forma simples os ganhos energéticos relativos a dois sistemas propostos. O simulador possui ainda uma capacidade interessante de calcular o número de luminárias consoante o tamanho do espaço. No entanto este simulador tem a desvantagem de não apresentar os dados económicos relativos a custos de investimento e instalação, assim como não está totalmente adaptado para o sector empresarial no sentido de ser incompleto nos *inputs* a pedir ao cliente de forma a gerar um relatório geral pouco detalhado.

Estimador de impacto Energético e Ambiental

Encontre a luz correta para sua aplicação. Esta ferramenta permite comparar diferentes opções de iluminação para cada aplicação em particular. Uma comparação lado a lado estimará que sistema proporcionará o melhor aproveitamento energético e ao mesmo tempo seja o mais favorável para o Ambiente.



**Figura 2.38: Simulador Current - Módulo de impacto energético e ambiental [33]**

Desta forma e face aos simuladores descritos anteriormente constatou-se que não existe uma alternativa completa para o processo de simulação dos sistemas de iluminação direccionada para entidades empresariais.

Os simuladores encontrados apresentam pouco detalhe no processo de descrição dos sistemas de iluminação, recorrendo a um catálogo curto que pode levar o utilizador a não encontrar o seu sistema. Por outro lado, para as situações encontradas foi possível observar diversas soluções apresentadas e possíveis de encomendar, no entanto ambos os simuladores não consideram a opção de instalação.

Assim sendo verifica-se que existem algumas falhas, com a possibilidade de melhoria através da criação de novos simuladores que contemplem os aspectos referidos anteriormente.

## Metodologia

Este capítulo tem como objectivo explicar a metodologia necessária para a construção do simulador de eficiência energética a realizar na EDP Comercial. O simulador a desenvolver e abordado na secção 3.1 foi denominado de simulador EDP, enquadrando-se no programa *Save to Compete* proposto pela EDP que tem como base o fornecimento de serviços de eficiência energética para empresas, garantindo assim o aumento da competitividade e sustentabilidade, evitando custos desnecessários.

Pretende-se que a metodologia do simulador seja elucidativa para uma implementação rápida e manuseamento fácil da ferramenta por parte da entidade EDP. Assim sendo e em conformidade com as secções 3.2 e 3.3 a ferramenta deve realizar uma análise aos sistemas de iluminação do cliente identificando potenciais medidas para redução do consumo de energia, sendo posteriormente necessário realizar a confirmação dos dados por parte de um técnico qualificado para proceder à instalação das soluções LED, conforme abordado na secção 3.4.

### 3.1.Simulador EDP

O simulador a desenvolver no âmbito da presente dissertação visa promover e aumentar a eficiência energética nas empresas, sendo que para esse efeito irá ser construído um simulador para optimização dos sistemas de iluminação, denominado de simulador EDP.

O simulador EDP deve permitir que os seus utilizadores observem as poupanças que resultam da troca do seu sistema de iluminação actual por outro mais eficiente e sustentável.

No acesso ao simulador EDP, o utilizador tem a vantagem de poder escolher um de dois módulos: módulo rápido e módulo detalhado. A única diferença dos módulos consiste no nível de detalhe pedido na caracterização dos sistemas de iluminação, sendo que o módulo rápido apresenta um design mais gráfico onde o utilizador apenas deve alterar as distribuições de cada luminária.

Uma das vantagens do simulador consiste na apresentação dos valores de investimento inicial e período de retorno de investimento para as medidas de substituição e de retrofit. Assim sendo depois de realizar a simulação o utilizador pode escolher a medida que pretende e posteriormente é gerado um relatório onde é apresentada uma comparação por zona entre a situação actual e a situação proposta, sendo exibidos os consumos e poupanças anuais permitindo ao cliente prosseguir com a instalação caso aceite os termos propostos.

Uma outra vantagem de recorrer ao simulador é o facto de caso o utilizador pretenda avançar com o processo, um técnico qualificado se deslocar às instalações do cliente para confirmar que a simulação foi efectuada de maneira correcta e assim agendar o processo de instalação.

Desta forma é possível constatar que o presente simulador tem inúmeras vantagens, visto permitir ao utilizador escolher entre simular os seus sistemas de iluminação respondendo a questões básicas e obter uma proposta em poucos minutos ou responder a questões mais técnicas e obter uma proposta com um grau de detalhe mais elevado. O facto de o utilizador poder escolher entre medidas de substituição ou retrofit aliado ao simulador estar inserido num projecto que desde a simulação até à instalação apenas se recorrer a uma entidade, acelera todo o processo de optimização dos sistemas de iluminação valorizando assim o respectivo simulador.



Figura 3.1: Esquema do projecto Save to Compete para iluminação [34]

O utilizador deverá numa fase inicial realizar um registo na plataforma *Save to Compete* para introdução de alguns dados básicos das instalações e garantir o acesso ao simulador. Após realizar o registo, procede para a análise das suas instalações através do processo de simulação e posteriormente selecciona a medida a implementar que terá as soluções escolhidas numa proposta a apresentar. Por fim e de modo a encerrar todo o processo, caso o utilizador aceite a proposta apresentada, deverá ser confirmada a simulação inicial por parte de um técnico qualificado no local e proceder à adjudicação de um contrato de forma a iniciar a instalação dos sistemas de iluminação simulados.

### 3.2.Arquitectura do Simulador

O simulador EDP destina-se à análise dos sistemas de iluminação dos utilizadores, com o objectivo de reduzir os custos energéticos e aumentar a eficiência energética do local em estudo. Desta forma o cliente deverá responder a determinadas questões que servirão de inputs no simulador, com o objectivo de substituir os seus equipamentos por uma solução equivalente LED, permitindo assim reduzir o custo de operação.

Deste modo o simulador de eficiência energética na iluminação deverá ser elaborado permitindo uma actualização das soluções propostas sempre que a entidade EDP necessite, sem comprometer e dificultar o acesso ao simulador. Os blocos principais constituintes da arquitectura do simulador encontram-se representados na seguinte figura:

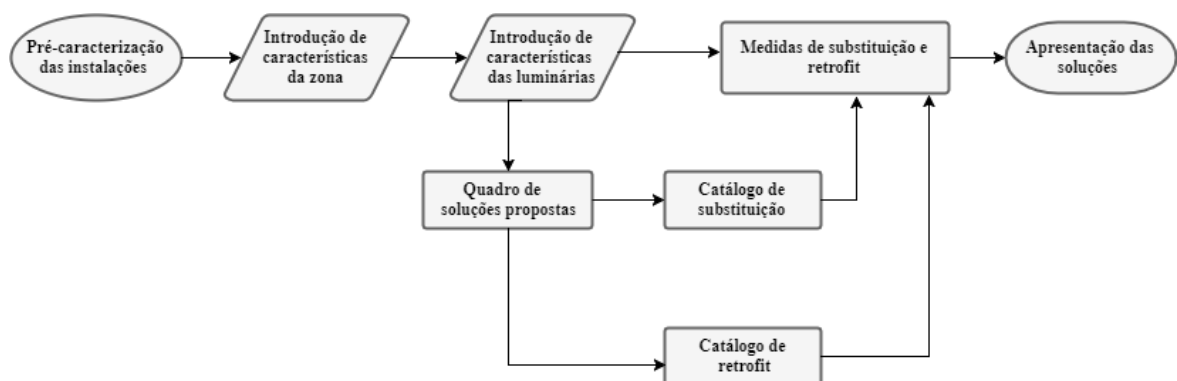


Figura 3.2: Arquitectura do simulador

## **Pré-caracterização das instalações**

Na zona de Pré-caracterização deverão ser respondidas algumas questões relacionadas com as instalações do cliente. Desta forma pretende-se obter dados sobre localização, tipo de sector, número de horas anuais da instalação e tarifas de consumo energético, evitando assim a repetição de dados no processo de simulação. Esta informação é apenas introduzida quando o cliente se regista na plataforma S2C.

## **Características da zona**

Neste espaço pretende-se definir as características relacionadas com o tipo de controlo na zona que deverá influenciar o consumo de cada local, o tipo de zona, perfil de utilização, nível de iluminação natural e altura actual da instalação de forma a se obter um consumo final por cada espaço, assim como os meios necessários para aquando da fase de instalação.

## **Características da luminária**

No que se refere às características das luminárias são definidos os inputs relacionados com o tipo e número de luminárias, número de lâmpadas por luminária, a tecnologia e o tipo de lâmpadas presentes na luminária, tipo de casquilho, tipo de balastro e a potência por lâmpada. Deste modo, com as características descritas pelo cliente é possível obter o perfil completo dos sistemas de iluminação em cada espaço de forma a ser identificado o consumo por luminária. Esta etapa tem especial importância no simulador porque a correta identificação das lâmpadas/luminárias actuais é fundamental para que posteriormente o simulador apresente a solução alternativa para cada caso, sendo que uma caracterização incorrecta por parte do utilizador deverá resultar na apresentação de soluções que não se adequam às suas instalações.

## **Quadro de soluções**

Quadro previamente definido com todas as combinações possíveis por parte do utilizador. Deste modo cada selecção de dados para os diferentes tipos

de fontes de luz e luminárias irão corresponder a uma solução target do mesmo tipo de equipamento com um consumo energético inferior. Cada solução deve ser aceite tendo em conta um fluxo luminoso mínimo, IRC e dimensões definidas, de forma a que o equipamento actual e a solução target sejam compatíveis.

O quadro de soluções deve englobar o catálogo de substituição e de retrofit onde se encontram as respectivas soluções para luminárias e fontes de luz. Este quadro deverá ainda ser de fácil acesso de modo a permitir actualizações rápidas por parte da EDP caso sejam encontradas no mercado soluções mais eficientes.

### **Medidas propostas**

Após a caracterização do sistema de iluminação actual e encontradas as soluções, deve ser gerado um relatório com as medidas a apresentar ao utilizador. Desta forma as medidas propostas de substituição e retrofit devem conter no seu relatório o número de novas luminárias/ lâmpadas, nome da referência, potência consumida, custos de instalação e de aquisição do produto, poupança de manutenção anual, poupança de energia e período de retorno do investimento, de maneira a que o utilizador possa observar os impactos energéticos e económicos resultantes da troca do sistema de iluminação.

### **3.3. Processo do Simulador**

Após observar a arquitectura do simulador procedeu-se à descrição dos módulos principais com o objectivo de compreender todo o seu processo. Este processo é definido por um conjunto de questões que visam avaliar o espaço a simular, assim como o conjunto de luminárias que o utilizador dispõe. Após essa caracterização prossegue-se a uma análise das eventuais medidas e impactos gerados.

Conforme referido na secção 3.1, o simulador EDP é dividido em dois módulos, detalhado e rápido, conforme o tempo e grau de conhecimento dos utilizadores relativamente ao seu sistema de iluminação.

### 3.3.1. Módulo detalhado

O processo relacionado com o módulo detalhado é destinado a utilizadores que possuam um grau de conhecimento mais avançado relacionado com o seu sistema de iluminação. Através de múltiplas questões relacionadas com o espaço e dados técnicos das luminárias foi possível definir um processo para o simulador no módulo detalhado.

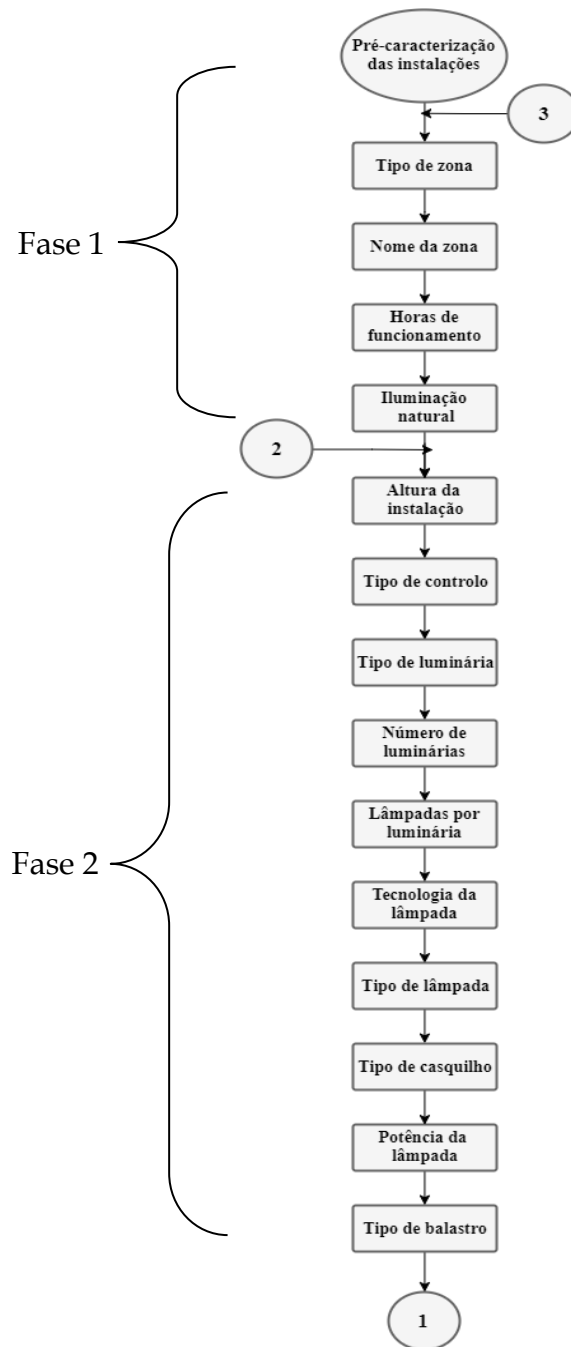
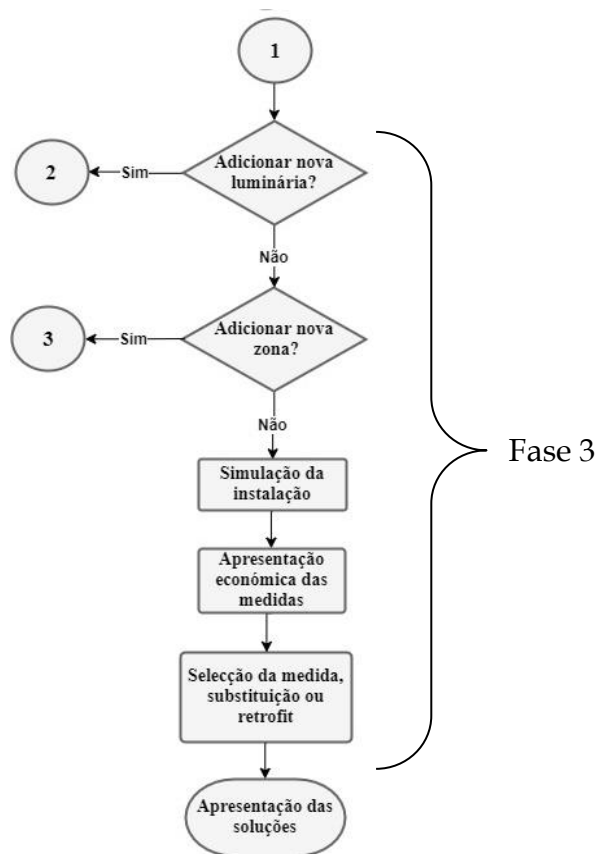


Figura 3.3: Fluxograma do processo do módulo detalhado





**Figura 3.4: Fluxograma do processo do módulo detalhado (continuação)**

De maneira a garantir uma melhor compreensão e devido ao extenso processo do módulo detalhado este foi dividido em três Fases: caracterização de zonas (Fase 1), caracterização de luminárias (Fase 2) e apresentação de resultados (Fase 3).

## Fase 1

Na fase inicial para aceder ao processo do módulo detalhado o utilizador deverá realizar uma pré-caracterização das suas instalações, onde terá que indicar informações relativas ao preço das tarifas eléctricas e tipo de sector que frequenta, de forma a personalizar as opções do processo de simulação.

Posteriormente à introdução dos dados iniciais, deve-se caracterizar as zonas da instalação que pretende simular indicando o tipo de zona, cujas opções deverão estar limitadas dependendo do tipo de sector indicado na pré-caracterização, o nome da zona, as horas anuais de funcionamento do sistema de

iluminação na presente zona e a indicação do nível de luminosidade natural por zona.

## **Fase 2**

A presente fase destina-se à caracterização das luminárias por parte do utilizador. Inicialmente pretende-se obter informação relativamente à altura das luminárias de forma a perceber o espaço e os recursos necessários para uma possível instalação de uma nova solução. Posteriormente deve ser indicado qual o tipo de controlo da luminária de maneira que o relatório gerado no fim tenha um consumo por zona mais preciso, visto que os diferentes tipos de controlo permitem poupanças energéticas variadas.

Após a descrição de todos os componentes externos, tenciona-se proceder à caracterização directa das luminárias começando por descrever qual o tipo de luminária, o número de luminárias e o número de lâmpadas por luminária, sendo que a escolha do tipo de luminária é fulcral pois define logo a gama de soluções possíveis a apresentar. Depois da introdução destas características o simulador deverá proceder segundo um diagrama de árvore, limitando as opções a escolher para a tecnologia da lâmpada, tipo de lâmpada, casquilho, potência de cada lâmpada e o respectivo balastro. Desta forma o utilizador terá maior probabilidade de encontrar uma solução, evitando assim a descrição de sistemas de iluminação inexistentes.

## **Fase 3**

A terceira fase é destinada à apresentação de soluções, sendo necessário primeiro introduzir no simulador os dados relativos à caracterização de zonas e de luminárias definidos anteriormente nas fases 1 e 2. Após a conclusão da fase 2 e de introduzidas todas as zonas que se pretendem simular, o simulador deve recorrer a um quadro tipo onde se encontram todos os casos possíveis de representação e ser capaz de detectar o sistema de iluminação descrito, indicando a respectiva solução para os cenários de substituição e retrofit. Depois de reunidas todas as soluções o simulador terá a capacidade de apresentar uma avaliação económica, onde devem ser mostrados os custos de investimento e *payback*

para as medidas de substituição e de retrofit, permitindo assim aumentar a capacidade de escolha do utilizador. O processo do módulo detalhado deve ficar concluído com a apresentação das soluções num relatório que deve conter unicamente as soluções do cenário escolhido anteriormente, os respectivos dados financeiros e uma comparação energética entre os sistemas de iluminação actuais e os sistemas propostos.

### 3.3.2. Módulo rápido

O módulo rápido é destinado a utilizadores que pretendam obter uma proposta mais imediata, sendo que o tempo dispendido no processo de simulação é relativamente curto. O processo do módulo rápido deve conter questões que são ideais para utilizadores com menor grau de conhecimento do seu sistema de iluminação, facilitando assim a simulação.

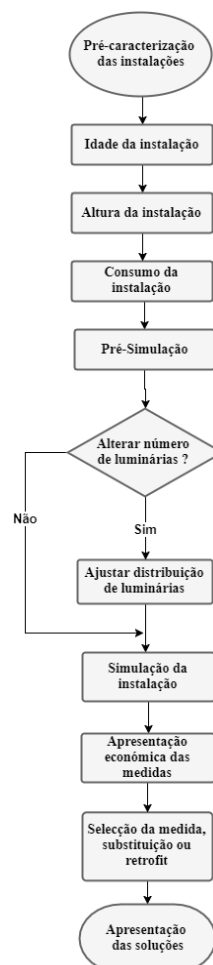


Figura 3.5: Fluxograma do processo do módulo rápido

Conforme se pode observar no fluxograma do processo do módulo rápido, este requer menos informações relacionadas com o sistema de iluminação para uma apresentação final das soluções, sendo necessário atribuir alguns pressupostos para o correcto funcionamento do simulador.

Inicialmente e à semelhança do módulo detalhado é necessário realizar uma pré-caracterização das instalações com o objectivo de reunir informações relacionadas com o tipo de sector, horário de funcionamento e tarifas eléctricas. Após a pré-caracterização são introduzidas no simulador as informações relacionadas com a idade e altura das luminárias da instalação com o objectivo de avaliar a disposição das luminárias. Outro parâmetro fundamental para se realizar a simulação é a indicação do consumo global de energia eléctrica da instalação que será responsável pela determinação do número de luminárias da instalação.

Depois de inseridos todos os parâmetros anteriormente especificados, o simulador com base nas informações recolhidas deverá realizar uma pré-simulação onde serão pré-preenchidos campos relacionados com o número total de luminárias da instalação, assim como a sua respectiva distribuição por tipo de tecnologia. O processamento do pré-preenchimento deverá ser personalizado consoante o tipo de sector e consumo da instalação, a fim de acelerar o processo de pré-simulação do utilizador. Caso o utilizador não concorde com a atribuição dos campos de pré-preenchimento o simulador deverá permitir de forma manual a alteração dos parâmetros do número total de luminárias e da sua distribuição.

Após a definição de todos os dados o processo de simulação é iniciado com o simulador a apresentar os aspectos financeiros como investimento e *payback* para as medidas de substituição e retrofit. O utilizador deve seguidamente seleccionar a medida que mais se ajuste ao seu caso e posteriormente o simulador deverá gerar um relatório com todos os dados económicos e consumos energéticos que advêm da troca do sistema de iluminação actual para um outro com soluções mais eficientes.

### 3.3.3. Comparação Módulo detalhado vs Módulo rápido

De acordo com os pontos discutidos no presente capítulo, o simulador EDP para aumento da eficiência energética na iluminação é dividido em dois módulos, detalhado e rápido, que procura responder às necessidades dos utilizadores consoante o seu grau de conhecimento. Tendo em conta as metodologias analisadas anteriormente procedeu-se à comparação de processos dos dois módulos.

Tabela 3.1: Comparação de processos entre módulo detalhado e módulo rápido

Processos	Módulo detalhado	Módulo rápido
Apresentação de proposta em 5 minutos	✗	✓
Apresentação de proposta em 30 minutos	✓	✗
Capacidade de pré-preenchimento	✗	✓
Adição de zonas e luminárias	✓	✗
Escolha de medidas (substituição e retrofit)	✓	✓
Apresentação de relatório com soluções	✓	✓

Através da Tabela 3.1 realizou-se uma comparação aos processos dos dois módulos, onde é possível observar que a metodologia do módulo rápido foi elaborada de forma a que todo o processo de simulação dure aproximadamente 5 minutos, enquanto que no módulo detalhado devido à descrição mais completa do sistema de iluminação estima-se que esse processo dure 30 minutos. A possibilidade de obtenção de uma proposta em 5 minutos está relacionada com a capacidade de pré-preenchimento do módulo rápido, onde será apresentado ao utilizador um conjunto de parâmetros como o número total de luminárias e a sua

distribuição que virão automaticamente preenchidos facilitando assim o processo de simulação.

No entanto o módulo detalhado permite uma simulação com resultados mais assertivos devido à descrição completa das características das zonas e de luminárias, sendo possível adicionar diversas zonas no processo de simulação, resultando num relatório mais preciso.

Outro processo associado a ambos os simuladores é a capacidade de estes apresentarem medidas de substituição e de retrofit, oferecendo ao utilizador a possibilidade de escolha das soluções. Por fim os dois módulos deverão apresentar um relatório completo com todos os dados económicos e um estudo comparativo entre o sistema de iluminação actual e o sistema proposto.

### 3.4. Metodologia do auditor

De forma a garantir que o processo de simulação foi efectuado correctamente é necessário um auditor qualificado deslocar-se às instalações do utilizador para confirmar que todas as normas de iluminação serão aplicadas aquando do processo de troca do sistema de iluminação.

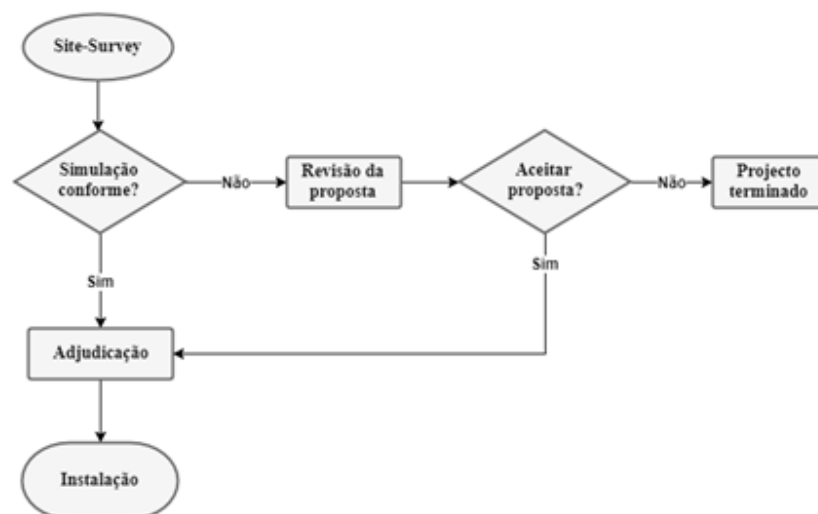


Figura 3.6: Fluxograma da metodologia auditor

Conforme se pode observar na Figura 3.6, após o processo de simulação estar concluído e caso o utilizador aceite a proposta é necessário confirmar os dados por parte de um auditor. Desta forma o processo do auditor é iniciado através da realização de um levantamento de dados da instalação e do seu sistema de iluminação, processo este denominado de *Site-Survey*. Na ficha *Site-Survey* o auditor deverá ter um simulador semelhante ao módulo detalhado onde tem adicionalmente a opção de editar todas as soluções previamente propostas para cada tipo de lâmpada e luminária, tornando o processo personalizável conforme os critérios do auditor e da opinião do cliente. A ficha de *Site-Survey* deve também referenciar os locais ou factores que dificultam o processo de instalação, assim como deverá permitir ao cliente a possibilidade de medir a luminância em determinadas zonas.

Após o *Site-Survey* e à semelhança dos módulos detalhado e rápido, será gerado um relatório final com todos os dados económicos referentes à troca de sistema de iluminação e uma comparação energética entre a tecnologia actual e a solução proposta. Depois do relatório final gerado no processo auditor, é realizada uma comparação com o relatório gerado pelo simulador aquando da descrição do utilizador e procede-se a uma análise de forma a verificar se estes são conformes. Se existir conformidade entre o sistema descrito pelo utilizador e o auditor, realiza-se a adjudicação de um contrato para posteriormente proceder ao processo de instalação.

Por outro lado, caso se verifique uma discrepância do sistema de iluminação descrito pelo auditor, deverá ser revista a proposta a apresentar e o utilizador após uma análise decidirá se concorda com os termos descritos pelo auditor e prosseguir para o processo de instalação ou recusa a proposta e termina o projecto.

Outro factor em consideração está relacionado com os fundos disponibilizados pelo PPEC, no qual após ser aceite a proposta do auditor deverá ser enviado um relatório para as entidades encarregues de avaliar as alterações energéticas a efectuar, com objectivo de estes analisarem a verba futuramente a disponibilizar que deve variar consoante as poupanças e eficiência energética alcançada no projecto.





# 4

## Implementação

Neste capítulo é descrita a implementação do simulador, que foi construído tendo por base as ideias descritas do capítulo da metodologia. Inicialmente na secção 4.1 é abordado o software do simulador e o porquê da sua escolha, sendo posteriormente explicado na secção 4.2 a execução do algoritmo da arquitectura do simulador proposto no capítulo 3.

Pretende-se ainda que neste capítulo seja explicado as diferentes perspectivas de implementação para o módulo detalhado e módulo rápido.

### 4.1. Software

O simulador desenvolvido na presente dissertação permite que o utilizador descreva o seu sistema de iluminação através de várias perguntas, que servem de inputs para encontrar uma solução mais eficiente. Desta forma pretende-se recorrer a um software que seja capaz de realizar todos os cálculos luminotécnicos para avaliar as diversas situações possíveis descritas pelo utilizador e que permita uma actualização dos dados de maneira rápida sem necessidade de alterar o algoritmo base do simulador.

O software escolhido para desenvolver o simulador foi a folha de cálculo, conhecido como Microsoft Excel, visto reunir todas as condições apresentadas anteriormente. O Microsoft Excel é uma ferramenta que permite armazenar os dados recolhidos e organizá-los em várias folhas de cálculo, facilitando assim a

organização e visualização da informação. Adicionalmente esta ferramenta tem diversas funcionalidades que facilitam a manipulação de dados, como por exemplo o preenchimento automático de tabelas através do reconhecimento padrão do utilizador e o facto de estar incluída a linguagem de programação *Visual Basic for Applications* (VBA), permitindo assim automatizar as funções do Excel.

Outro factor que contribuiu para a escolha do Microsoft Excel como o software a utilizar no simulador foi o facto de estar integrado num projecto da EDP, que identificou este tipo de software como sendo o melhor para desenvolver o simulador visto incluir uma interface intuitiva, facilitando assim o acesso à alteração do algoritmo do simulador. A grande versatilidade deste tipo de software foi outro motivo para a sua escolha visto permitir construir gráficos que fundamentam e comparam as soluções obtidas assim como possibilita a ligação a uma base de dados.

Deste modo conclui-se que a escolha do Microsoft Excel foi a mais indicada pois a sua acessibilidade permite que grande parte dos programadores tenha este software, evitando assim a instalação ou problemas de compatibilidade com novos programas e o facto de o simulador recorrer à troca de informação contida em várias tabelas e sendo este um software especializado nesse aspecto resulta que todo o processo decorra de forma célere.

## **4.2. Construção do simulador**

Para a construção do simulador foi necessário desenvolver algumas etapas para garantir que todas as funcionalidades presentes do simulador estão de acordo com a metodologia apresentada anteriormente.

### **4.2.1. Avaliação de Luminárias/Lâmpadas target**

O primeiro passo para a implementação do simulador consiste na criação de um quadro com todos os requisitos necessários para os fornecedores preencherem com as respectivas soluções LED's mais eficientes. Este quadro de soluções deve conter todas as lâmpadas e luminárias possíveis de serem descritas pelo utilizador, sendo que a cada lâmpada/luminária deve de ser apresentado

alguns requisitos mínimos como dimensões, temperatura de cor, IRC target, eficiência energética e fluxo inicial target.

Característica equipamento LED - Requisitos a pedir							Características a preencher pelo fornecedor							
Família	Dimensão aproximada	Eficiência energética target	Fluxo inicial target LED (lm)	Temp. de cor mínima (K)	Temp. de cor máxima (K)	IRC target	Preço	Potência da luminária (W)	Fluxo da luminária (lm)	Temp. de cor (K)	IRC (%)	Vida útil (horas)	Dimensões das luminárias (mm)	
	(mm)	(lm/W)					1							
Campânulas	Diâmetro 500 mm	100	10710	3000	4000	0.7								
				4000	5000									
				5000	6500									
		110	17850	3000	4000									
				4000	5000									
				5000	6500									
		115	25320	3000	4000									
				4000	5000									
				5000	6500									
Dicroicas	5,5 cm	85	565	3000	4000	0.9								
				4000	5000									
				5000	6500									
		92	808	3000	4000									
				4000	5000									
				5000	6500									
Painéis	600 x 600 mm	85	3500	3000	4000	0.9								
				4000	5000									
				5000	6500									
	300 x 1200 mm	95	3700	3000	4000									
				4000	5000									
				5000	6500									

Figura 4.1:Exemplo do quadro de soluções

Desta forma foi elaborado um quadro de soluções passível de ser actualizado com todas as novas soluções de eficiência energética para as diversas famílias de lâmpadas e luminárias.

Como é possível observar através da Figura 4.1, o quadro de soluções tem as características do equipamento a pedir ao fornecedor por família de lâmpadas/luminárias, devendo este de seguida preencher um conjunto de parâmetros relacionados com estas.

As características que mais se destacam nos requisitos a pedir são a eficiência energética e o fluxo luminoso útil target,  $F(t)$ , sendo este calculado através da seguinte expressão:

$$F(t) = TLL * LOR * UF * LLF(t) \quad (4.1)$$

#### TLL (Total Lamp Lúmens)

Sigla referente ao fluxo luminoso total emitido por lâmpada, sendo este valor tipicamente indicado pelo fornecedor e expresso em lúmens.

### **LOR (Light Output Ratio)**

Define o rendimento útil da luminária, sendo obtido através do quociente entre o fluxo luminoso total da luminária, constituído por fluxo ascendente e descendente, e a soma do fluxo luminoso individual das lâmpadas quando operadas fora da luminária. Este valor tem em consideração a energia perdida como forma de calor, sendo expressa em percentagem e por norma indicado pelo fornecedor.

### **UF (Utilization Factor)**

O Factor de Utilização é definido pela proporção de fluxo luminoso emitido por uma fonte de luz que incide o plano de trabalho. Este valor pode ser afectado pela altura da instalação da luminária, assim como a proporção e possível refletância do espaço.

Uma vez que alguns dados relacionados com a refletância do espaço não são pedidos ao utilizador, foram definidos no simulador alguns valores para o factor de utilização tendo em conta a potência da luminária e a altura da instalação mais usual por tipologia de luminária.

### **LLF (Light Lost Factor)**

As perdas de luz são um factor a considerar aquando no cálculo do fluxo luminoso. Esta depreciação do fluxo luminoso aumenta no decorrer do tempo de utilização da lâmpada, sendo que as principais causas são a degradação do fluxo luminoso com o aumento da utilização devido à falta de manutenção e a acumulação de sujidade.

Este valor é expresso em percentagem, podendo esta aumentar através de acções preventivas ou troca de lâmpadas.

## **4.2.2. Identificação do sistema de iluminação**

O utilizador deve descrever o seu sistema de iluminação introduzindo os respectivos dados no simulador. Desta maneira o utilizador deve responder a questões de forma a ser obtido o seu consumo actual por zona, sendo que estas estão divididas por características de zona e caracterização das luminárias.

Na caracterização de zona alguns dos inputs pedidos como por exemplo a altura da instalação, de forma a se prever os meios a deslocar ao local e consequentemente determinar os custos de instalação, assim como o tipo de controlo do espaço que terá impacto no consumo final de zona uma vez que para cada tipo de controlo está associado no simulador um factor multiplicativo consoante a escolha do utilizador, visto que existem controlos mais eficientes que por sua vez permitem reduzir o desperdício energético.

Apesar das características de zona terem influência no consumo, são as características associadas à escolha de luminárias que maior impacto tem no consumo final. Deste modo o tipo de luminária e a potência por lâmpada têm um grande peso quer no consumo actual, quer nas respectivas soluções a apresentar. Face a dificuldade que o utilizador poderia sentir ao responder aos inputs pedidos, a caracterização de luminárias foi implementada pedindo inicialmente informações mais gerais sobre o sistema de iluminação, para posteriormente o limitar nas opções possíveis de descrição aquando na resposta de questões mais técnicas.

	id	1	2	3
Características zona	Tipo zona	Corredor	Outra	Área de armazenamento
	Nome zona	corre1	sala	espaço1
	Horas anuais de funcionamento [h]	3100	2700	3200
	Iluminação actual adequada?	Insuficiente	Excessiva	Insuficiente
	Altura da instalação ?	Superior a 6 metros	Inferior a 3 metros	Entre 3 e 6 metros
	Tipo de controlo	Sensor crepuscular	Interruptor normal	Interruptor normal
Caracterização luminárias	Tipo de luminaria	Dicroicas	Downlight (210-230mm)	Estanques (1300mm)
	Nr de luminárias	5	10	18
	Lâmpadas por luminária (uni)	1	2	2
	Tecnologia lâmpada	Halogéneo	Fluorescente	Fluorescente
	Tipo de lâmpada	Spot	Compactas não integradas	Tubulares T8
	Casquilho	GU4	G24q	G13
	Pot lâmpada [W]	35	26	36
	Balastro	N/A	Eletrónico	Ferromagnético
	Potencia total [W]	131	627	1620
	Consumo anual total [Kwh/ano]	407	1692	5184

Figura 4.2: Quadro de inputs do utilizador

Como é possível observar na Figura 4.2, o sistema de iluminação encontra-se identificado podendo o utilizador adicionar as várias zonas que pretende simular, sendo que cada coluna representa a introdução de uma nova luminária numa certa zona.

É importante referir ainda que o quadro presente na Figura 4.2 diz respeito ao Excel, sendo que as informações contidas neste foram replicadas para a plataforma online S2C onde os utilizadores de forma mais interativa devem responder a estes inputs. Após o preenchimento online destas informações, a plataforma S2C envia as respostas para o simulador onde os cálculos luminotécnicos são realizados.

### **4.2.3. Identificação de soluções**

Na identificação de soluções encontram-se as medidas propostas, substituição e retrofit, sendo estas realizadas após a introdução dos dados por parte do utilizador. Depois da introdução dos dados, o simulador deve identificar quais os sistemas de iluminação simulados e procurá-los no quadro de soluções de forma a indicar a correspondente solução.

Numa primeira fase é realizado o cenário de substituição, onde depois de encontrada a solução são identificados os respectivos dados relacionados com a caracterização das luminárias e a sua caracterização de potência, ambos indicados pelos fornecedores. Este cenário considera ainda uma parte económica onde se encontra explícito o investimento a efectuar, nomeadamente o custo de aquisição das luminárias e o seu custo de instalação, sendo este último definido por um quadro de cotação dos trabalhos definido pelos instaladores onde se apresentam todos preços para os trabalhos com recurso a mão de obra. A outra componente económica a considerar são as poupanças, onde se encontram referidas as poupanças de manutenção resultantes da troca do sistema de iluminação assim como a respectiva poupança energética.

Por último é apresentado o período de retorno do investimento (PRI), com o objectivo de visualizar o tempo necessário até adquirir uma poupança viável no projecto.

Cenário Proposto: Substituição	Caracterização luminárias	Nº novas luminárias	5	10	18
		Nome Luminária proposto	Milano Small T	Fosnova Speaker 2	Disano 961 Hydro
		Nº lâmpadas por luminária	1	2	2
	Caracterização de Potências	Potência luminária [W]	6.5	22	38
		Potência total consumida [W]	24.375	220	684
		Consumo anual final [Kwh/ano]	76	594	2189
	Investimento	Custo luminária [€/uni]	26.25 I	37.50 I	63.75 I
		Custo total luminárias [I]	164.06 I	468.75 I	1434.38 I
		Custo instalação luminárias [I]	96.56 I	167.99 I	534.69 I
	Poupanças	Nº de substituições por ano actual	0.775	0.450	0.291
		Poupança de manutenção actual [I]	9.69 I	31.50 I	31.42 I
		Poupança de Energia [I]	38.69 I	128.16 I	349.73 I
	PRI	Payback luminárias (anos)	5.4	4.0	5.2

Figura 4.3: Dados do cenário de substituição

Na segunda fase é calculado o cenário de retrofit, cujo processo é semelhante ao cenário de substituição com a particularidade de as soluções propostas serem relacionadas sobretudo às lâmpadas.

Este cenário deverá apresenta soluções relacionadas com o retrofit, no entanto há casos onde este cenário não é viável por questões de optimização de fluxo luminoso útil ou por práticas de mercado, sendo que para estas ocorrências apresenta-se a respectiva solução de substituição.

Cenário Proposto: Retrofit	Caracterização lâmpadas	Nº total lâmpadas	5	10	36
		Nome Lâmpada proposto	Philips CorePro	Fosnova Speaker 2	Tubo LED GE
	Caracterização de Potências	Potencia Lâmpada unitaria [W]	6.5	22	18
		Potencia_total consumida [W]	24.375	220	648
		Consumo anual final [Kwh/ano]	76	594	2074
	Investimento	Custo lâmpada [€/uni]	6.85 I	37.50 I	14.50 I
		Custo total lâmpadas [I]	42.80 I	468.75 I	652.50 I
		Custo instalação lâmpadas [I]	117.20 I	167.99 I	942.32 I
	Poupanças	Nº de substituições por ano actual	1.550	0.450	0.267
		Poupança de manutenção actual [I]	19.38 I	31.50 I	28.80 I
		Poupança de Energia [I]	38.69 I	128.16 I	363.18 I
	PRI	Payback Lâmpadas (anos)	2.8	4.0	4.1

Figura 4.4: Dados do cenário de retrofit

Comparando ambos os cenários propostos na Figura 4.3 e Figura 4.4, podemos observar que ambos são calculados através do mesmo princípio, ou seja, inicialmente o simulador identifica qual o sistema de iluminação simulado pelo utilizador e posteriormente recorre ao quadro de soluções indicando uma medida de substituição e de retrofit para cada caso, sendo que por norma no cenário de retrofit os períodos de retorno de investimento são inferiores face aos menores custos de aquisição das lâmpadas comparativamente à obtenção de uma nova luminária.

#### 4.2.4. Análise dos sistemas

A análise dos sistemas é o processo posterior à identificação de soluções, sendo gerado um relatório com comparações energéticas resultante da troca de sistema de iluminação.

Após a identificação de soluções são apresentados os racionais relacionados com as duas medidas propostas, devendo o utilizador escolher a situação que melhor se adequa ao seu caso.

Racional Substituição			Racional Retrofit		
Investimento (€)	Poupança bruta anual (€)	Período de retorno (anos)	Investimento (€)	Poupança bruta anual (€)	Período de retorno (anos)
3 954.69 €	589.18 €	6.7	3 467.40 €	609.70 €	5.7

Figura 4.5: Escolha do racional

Depois de escolhido o racional é então gerado um relatório onde é possível observar um resumo total das tecnologias simuladas, a situação energética das tecnologias actuais por zona, a situação proposta resultante do processo de simulação e por fim uma comparação entre a situação actual e proposta com o objectivo de identificar os impactos esperados provenientes da troca de sistema de iluminação.



Substituição

Resumo tecnologias existentes

Mix de tecnologias	Substituição de luminárias	Campânula	0
		Dicroicas	5
		Paineis	0
		Downlight	10
		Estantes	18
		Bloco Emergência	0
		Projctor VSAP	0
	Retrofit	Viárias	0
		Tubo T8 - 600mm	0
		Tubo T8 - 1300mm	0
		Tubo T8 - 1600mm	0
		Halógeno	0
	Total		-

Situação existente

Nome zona	Equipamento actual	Quantidade luminárias	Quantidade lâmpadas por luminária	Potência unitária [W]	Potência Total [W]	Horas anuais
correl	Dicroicas	5	1	35	131	3 100
sala	Downlight (210-230mm)	10	2	52	627	2 700
espaço1	Estantes (1300mm)	18	2	72	1620	3 200
Total	-	33	-	-	2 378	-

Figura 4.6: Resumo energético situação actual

Outra característica do simulador consiste no facto de este não apresentar alternativas caso a solução descrita pelo utilizador contenha a tecnologia LED, visto que a troca desta tecnologia por outra do mesmo tipo não é viável na relação preço-poupança. Deste modo caso seja simulada alguma tecnologia deste tipo deverá aparecer no relatório final como equipamento proposto uma mensagem dizendo: Manter a luminária existente.

Substituição

Situação proposta

Nome zona	Equipamento proposto	Número de luminárias ou lâmpadas	Quantidade lâmpadas por luminária	Potência unitária (W)	Potência Total (W)	Horas anuais
correl	Milano Small T	5	1	7	24	3 100
sala	Fosnova Speaker 2	10	2	22	220	2 700
espaço1	Disano 961 Hydro	18	2	38	684	3 200
Total	-	33	-	-	928	-

Impactos esperados

Nome zona	Potência instalada (W)		Utilização Anual (h)		Consumo (kWh/ano)		Poupança anual	
	Actual	Proposta	Actual	Proposta	Actual	Proposto	kWh	l
correl	131	24	3 100	3 100	407	76	331	48.37 l
sala	627	220	2 700	2 700	1632	594	1038	159.66 l
espaço1	1620	684	3 200	3 200	5 184	2 189	2 995	381.15 l
Total	2 378	928	-	-	7 282	2 858	4 424	589.18 l

Figura 4.7: Resumo energético proposto

A Figura 4.8 apresenta o impacto económico no decorrer do tempo, onde é possível observar a acumulação das poupanças perante o investimento inicial.

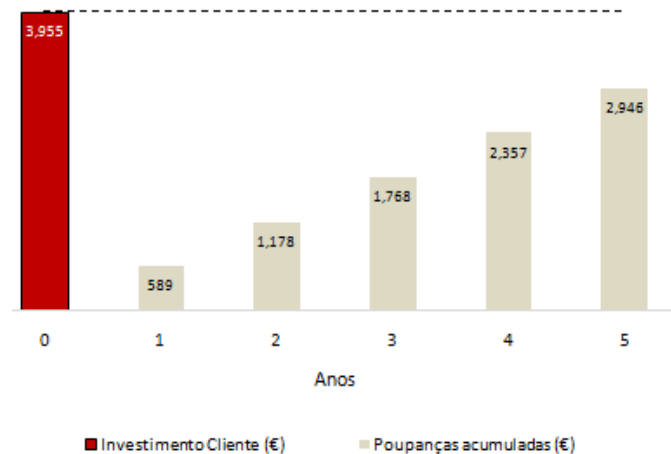


Figura 4.8: Comparação Investimento vs Poupanças

#### 4.2.5. Funcionalidades do Módulo rápido

Conforme referido no capítulo 3, o módulo rápido é destinado aos utilizadores que pretendam obter uma proposta de melhoria da eficiência energética num curto espaço de tempo e que não possuam conhecimentos aprofundados dos seus sistemas de iluminação.

Assim sendo a primeira etapa para a implementação do módulo rápido consiste em caracterizar o sistema de iluminação através do input de três questões básicas, com o objectivo de se realizar um dimensionamento automático do sistema de iluminação das instalações do utilizador.

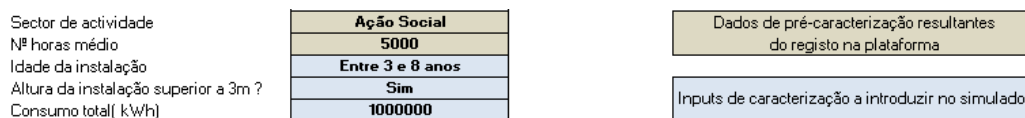


Figura 4.9: Pré-simulação do módulo rápido

Após a introdução dos inputs para a pré-simulação do módulo rápido, foi realizada a funcionalidade de pré-preenchimento com a finalidade de acelerar o processo de simulação e caracterizar de forma automática as instalações do cliente. De forma a simplificar a caracterização considerou-se apenas uma luminária representativa por tipologia.

A implementação da funcionalidade de pré-preenchimento foi um dos processos com maior dificuldade de execução devido às diversas variáveis a considerar, entre elas o sector, idade e consumo da instalação, que contribuem para um preenchimento personalizado das percentagens de cada luminária.

Assim sendo, inicialmente obtemos o consumo de energia eléctrica correspondente à iluminação que é calculado através de uma percentagem do consumo total da instalação e que varia dependendo do sector. Após determinar o consumo pertencente à iluminação, determinamos o número de luminárias por tipologia uma vez que é sabida a percentagem por distribuição de luminárias resultante do processo de pré-preenchimento. Este processo de cálculo do número de luminárias resultante da funcionalidade de pré-preenchimento foi denominado de *first guess*.

1st Guess			
Tecnologia luminária	Consumo iluminação pré-preenchido 1º caso (kWh)	Consumo por tecnologia 1º caso (kWh)	Nº luminárias 1º caso
Fluorescente linear	200000	20000	56.00
Fluorescente modular		80000	223.00
Campanula/Projectores		10000	8.00
Halógeno		20000	80.00
LED/T5		30000	300.00
Fluorescente compacta		40000	223.00
<b>Total</b>	-	<b>200000.00</b>	<b>890.00</b>

Figura 4.10: Processo first guess

Depois de efectuado o pré-preenchimento do sistema de iluminação, o utilizador deve confirmar se este foi efectuado correctamente. Esta verificação é então realizada através do mapa de distribuição.

O mapa de distribuição é uma funcionalidade do módulo rápido que permite ao utilizador caracterizar a distribuição das luminárias, apresentando então um design simples de forma a facilitar a interacção com o utilizador. A distribuição das luminárias indica a percentagem de cada tipo luminária que o utilizador tem nas suas instalações. Quando o utilizador acede ao mapa de distribuição,

inicialmente os inputs deste já se encontram com valores colocados devido á capacidade de pré-preenchimento, no entanto o utilizador caso detete algum erro pode alterar e colocar a percentagem da respectiva luminária.

1. Luminárias

Nº de luminárias existentes  
Nº luminárias editável

De 500 a 1000  
0

2. Mapa de distribuição

Fluorescente T8

Bloco

Campanulas/Projectores

LED T5

Halógeno

Downlight

**Figura 4.11: Mapa de distribuição**

Conforme se pode observar na Figura 4.11, foi implementado o mapa de distribuição que inicialmente encontra-se ocupado face ao pré-preenchimento inicial, assim como o parâmetro que inclui o número de luminárias da instalação, sendo este apresentado em intervalos para facilitar uma possível alteração do utilizador. Estes valores referência devem agora ser confirmados, podendo o utilizador alterar o mapa de distribuição e colocar ainda a quantidade exacta de luminárias caso disponha dessa informação, sendo esta última informação colocada no parâmetro número de luminárias editável.

Depois de confirmados os dados da simulação, o módulo rápido prossegue os processos explicados anteriormente nas secções 4.2.3 e 4.2.4, por forma a ser apresentada uma proposta ao utilizador.

### 4.3.Ficha Site-Survey

O modo auditor é um processo a realizar caso o utilizador aceite os termos inicialmente propostos do relatório após a realização da simulação dos seus

sistemas de iluminação, sendo que o próximo passo consiste na deslocação do auditor ao local para preenchimento da ficha *Site-Survey*.

Desta forma a implementação da ficha *Site-Survey* foi focada com o objectivo da apresentação de soluções ser um processo completamente editável, visto que o auditor possui um simulador semelhante ao módulo detalhado. Assim sendo o auditor pode escolher a solução a propor independentemente do sistema inicialmente descrito, sendo que desta maneira o auditor pode alterar o número e tipologia da luminária a instalar, podendo assim não existir uma troca directa da luminária por outra da mesma família.

Outras funcionalidades da ficha *Site-Survey* estão relacionadas com o preenchimento de informação relativa ao local da instalação. Foram então criados quadros passíveis de serem preenchidos a fim de identificar e facilitar o processo de instalação, assim como permitem assinalar custos adicionais do projecto. Adicionalmente foi criado um quadro para o utilizador indicar possíveis zonas da instalação, geralmente zonas de maior importância, onde serão realizadas medições de iluminância, garantindo assim que o espaço se encontra dentro dos valores recomendados.

IE1 Tem plantas da instalação em formato digital (com iluminação e/ou geral)? ☐

IE2 Preencha os seguintes quadros para medições da iluminância em zonas alvo e custos adicionais encontrados

Nome zona	Potência por luminária (W)	Iluminância (lux)	Simular zona (dialux)

Custo adicional	Descrição	Quantidade	Total
			0.001
			0.001
			0.001
			0.001

IE3 Existe algum sistema de gestão/controlo da iluminação? [Sim / Não] ☐

IE3.1 Qual? [GTC / Relógio / Reg. Fluxo / Presença / Outro] ☐

IE4 Há interesse em avaliar a iluminação de emergência? [Sim / Não] ☐

IE4.1 Como é alimentado o circuito de emergência? [Gerador / Bateria / Outro] ☐

IE5 Identificar os locais onde possam surgir dificuldades de instalação

Designação do espaço	Dificuldade

Figura 4.12: Quadros da ficha *Site-Survey*

A ficha *Site-Survey* foi então desenvolvida com o objectivo de auxiliar o auditor, facilitando e agilizando todo o processo uma vez que este processo ocorria em suporte de papel. A sua implementação apresenta um design simples, uma vez que o objectivo é garantir que o auditor consiga de forma intuitiva preencher a ficha de dados. A Figura 4.12 mostra os quadros criados no Microsoft Excel no qual serão colocados os dados das instalações do cliente para que o simulador possa proceder à realização dos cálculos luminotécnicos de forma a ser apresentada uma proposta, no entanto em conjunto com a EDP pensou-se que o modo mais correcto de proceder para diminuir as falhas no preenchimento das tabelas por parte do auditor passaria por replicar a ficha *Site-Survey* para suporte web, de forma a que os auditores consigam realizar este processo numa plataforma móvel, tornando o conteúdo mais gráfico e o processo do auditor mais rápido. Em suma pretende-se que o auditor preencha os inputs na ficha *Site-Survey* online para posteriormente serem enviadas essas respostas para o Excel de forma a serem realizados os cálculos e a ser gerado o relatório com as soluções propostas.

## Casos de Estudo

Conforme referido nos capítulos anteriores, o desenvolvimento do presente simulador foi realizado em parceria com a EDP. Esta parceria possibilitou a divulgação de alguns dados relativos a empresas que procederam a uma análise energética utilizando o simulador desenvolvido, sendo que para efeito de sigilo não foram divulgados os nomes das empresas cujos casos de estudo são apresentados.

Desta forma, neste capítulo são abordados dois projectos cuja alteração do sistema de iluminação foi efectuada, permitindo testar e comprovar os resultados obtidos para cada um dos casos de estudo, no qual são apresentadas soluções energeticamente mais eficientes de modo a verificar o impacto económico.

### 5.1. Escolha dos casos de estudo

Foram simulados dois projectos de iluminação, no qual foram obtidos diferentes resultados para os casos de estudo. No caso de estudo 1 foi realizada uma proposta de retrofit, enquanto que no caso de estudo 2 foi efectuada uma proposta de substituição das luminárias. Assim os projectos seguidamente apresentados permitem testar todos os cenários possíveis, uma vez que se encontram enquadrados em situações diferentes.

### 5.1.1. Caso de estudo 1

O projecto correspondente ao caso de estudo 1 prevê sempre que possível a medida de retrofit das lâmpadas existentes por lâmpadas mais eficientes de tecnologia LED, sendo que para as ocorrências em que não é viável o retrofit a substituição das luminárias é efectuada.

**Tabela 5.1: Situação actual do caso de estudo 1**

Zona	Equipamento actual	Quantidade luminárias	Quantidade lâmpadas por luminária	Potência unitária lâmpada (W)	Potência total lâmpada + balastro (W)	Horas anuais
Vendas	Estanques (1300mm)	136	1	36	6.120	4.380
Vendas	Downlight (150-180mm)	93	1	18	1.674	4.380
Vendas	Estanques (1600mm)	747	1	58	54.158	4.380
Vendas	Dicroicas	21	1	50	1.050	4.380
Vendas	Downlight (210-230mm)	14	1	32	448	4.380
Vendas	Estanques (1600mm)	8	1	49	392	4.380

Perante o perfil das luminárias simuladas consegue-se observar que o tipo de equipamento predominante são as estanques, pelo que podemos concluir que a troca de lâmpadas neste tipo de luminárias representará grande parte da poupança adquirida.

**Tabela 5.2: Situação proposta para caso de estudo 1**

Zona	Equipamento actual	Quantidade luminárias	Quantidade lâmpadas por luminária	Potência unitária lâmpada (W)	Potência total lâmpada (W)	Horas anuais
Vendas	Tubo LED ST8A-1,2m	136	1	14	1.904	4.380
Vendas	Downlight LED Slim Round DN155 12W	93	1	12	1.116	4.380
Vendas	Tubo LED ST8A-1,5m	747	1	20	14.940	4.380
Vendas	Lâmpada LED Parathom MR16 50	21	1	7	151	4.380
Vendas	Manter luminária existente	14	1	32	448	4.380
Vendas	PDPL-I 01 16014-80 de 4465lm P6	8	1	30	236	4.380



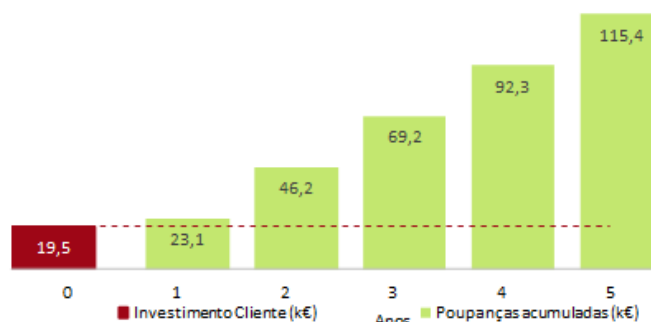
Observando a Tabela 5.2 pode-se constatar que os equipamentos propostos têm um consumo energético bastante inferior aos actualmente instalados. Também é possível observar que no caso da Downlight (150-180mm) procedeu-se à troca integral da luminária, enquanto que para a Downlight (210-230mm) foi aconselhado a manter a luminária actual uma vez que esta já era da tecnologia LED e a sua substituição não era viável do ponto de vista económico.

**Tabela 5.3: Impactos esperados para caso de estudo 1**

Zona	Potência instalada (W)		Utilização Anual (h)		Consumo (kWh/ano)		Poupança anual	
	Actual	Proposta	Actual	Proposta	Actual	Proposta	kWh	€
Vendas	6.120	1.904	4.380	4.380	26.806	8.340	18.466	2.177
Vendas	1.674	1.116	4.380	4.380	7.332	4.888	2.444	506
Vendas	54.158	14.940	4.380	4.380	237.210	65.437	171.773	19.823
Vendas	1.050	151	4.380	4.380	4.599	662	3.937	490
Vendas	448	448	4.380	4.380	1.962	1.962	0	0
Vendas	392	236	4.380	4.380	1.717	1.034	683	83

Através da Tabela 5.3 observamos os impactos esperados para o caso de estudo 1, sendo realizada uma comparação directa entre a situação actual e situação proposta. Foi ainda possível constatar que em muitos casos o consumo para uma tecnologia mais eficiente é duas a três vezes inferior quando comparado com a tecnologia actualmente instalada. Desta forma grande parte da poupança adquirida advém das luminárias do tipo estanque.

Poupança Anual (€)	Redução anual na fatura de iluminação (%)	Período de Retorno do Investimento (Anos)
23.081	70,5	0,8



**Figura 5.1: Racional económico do caso de estudo 1**

Analisando a Figura 5.1 verifica-se que a troca do sistema de iluminação resulta numa poupança anual de 23.081 €, correspondente a uma diminuição de 197.303 kWh do consumo energético. Esta diminuição do consumo representa aproximadamente 70.5% de redução anual relativamente à fatura de iluminação actual.

No ponto de vista económico o cliente investe cerca de 19.500 €, no entanto como o projecto tem uma grande poupança o tempo de retorno do investimento é inferior a 1 ano, sendo possível observar um retorno quase imediato permitindo assim ao cliente redireccionar a verba para outros sectores da empresa.

### 5.1.2. Caso de estudo 2

O projecto correspondente ao caso de estudo 2 prevê a medida de substituição das luminárias existentes por luminárias mais eficientes de tecnologia LED.

**Tabela 5.4: Situação actual do caso de estudo 2**

Zona	Equipamento actual	Quantidade luminárias	Quantidade lâmpadas por luminária	Potência unitária lâmpada (W)	Potência total lâmpada + balastro (W)	Horas anuais
Zona1	Campânula	11	1	150	1.793	5.000
Zona2	Painéis (600*600mm)	1500	4	72	135.000	5.000

De acordo com a situação actual do cliente concluímos que grande parte da energia consumida provem dos painéis, apesar da potência unitária da campânula ser muito superior. Por sua vez, o número total deste tipo de luminárias é quase insignificante quando comparado com os painéis, pelo que a substituição destes vão representar a maioria da poupança obtida.

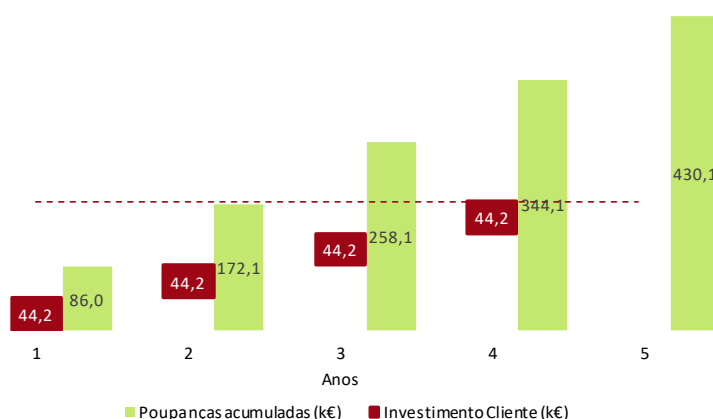
**Tabela 5.5: Impactos esperados para caso de estudo 2**

Zona	Potência instalada (W)		Utilização Anual (h)		Consumo (kWh/ano)		Poupança anual	
	Actual	Proposta	Actual	Proposta	Actual	Proposta	kWh	€
Zona1	1.793	1.320	5.000	5.000	8.967	6.600	2.367	584
Zona2	135.000	60.000	5.000	5.000	675.000	300.000	375.000	85.444

Através da Tabela 5.5 é possível observar que na Zona1 cada equipamento proposto cujo consumo é de 120 W permite no geral poupar cerca de 2.367 kWh.

Por outro lado, na Zona2 o equipamento proposto consome 40 W, possibilitando assim grande parte da poupança gerada no projecto, uma vez que a eficiência energética do equipamento proposto é superior 2.25 vezes em relação ao equipamento actual, garantindo assim uma poupança equivalente a 85.444 €.

Poupança anual (€)	Redução anual na fatura de iluminação (%)	Período de retorno do investimento (Anos)
86.029	55,1	2,1



**Figura 5.2: Racional económico do caso de estudo 2**

Conforme pode ser verificado através da Figura 5.2, o procedimento que leva à troca de câmpânulas e painéis resulta numa poupança anual de 86.029 €, correspondente a uma redução total de 377.367 kWh no consumo energético. Esta troca do sistema de iluminação representa aproximadamente 55.1% de redução anual na fatura de energia eléctrica da iluminação.

Relativamente ao aspecto económico, neste projecto foi concedido a opção de investimento inicial em prestações a fim de facilitar o pagamento do cliente, sendo que este deve investir cerca de 44.200 € por ano até perfazer o custo total do projecto de 176.640 €. Através das poupanças obtidas é possível obter um retorno do investimento passados aproximadamente 2 anos, permitindo assim atingir resultados viáveis num curto espaço de tempo.



## Conclusões e trabalhos futuros

Neste capítulo é realizada uma apreciação relativamente aos objectivos definidos inicialmente, assim como são retiradas conclusões relativas aos simuladores existentes, importância da criação de um novo simulador e adaptabilidade do simulador. No fim são sugeridos alguns tópicos para trabalhos futuros.

### 6.1.Principais conclusões

O trabalho desenvolvido que conduziu à presente dissertação permitiu a construção de um simulador que procede a uma auditoria energética e que indica soluções mais eficientes e sustentáveis, sendo este focado para o sector empresarial onde o consumo de energia e os desperdícios energéticos podem atingir gastos significativos.

Sabendo que a iluminação é uma área competitiva, a criação de um simulador constitui uma vantagem para as empresas que optam por um espaço onde os seus clientes possam analisar os seus sistemas de iluminação, permitindo diminuir o tempo para obtenção de resultados, assim como possibilita que o tempo para se proceder a uma análise de relatórios seja reduzido.

Deste modo, o simulador desenvolvido tem a vantagem de permitir ao utilizador simular consoante o seu grau de conhecimento, considerando soluções de substituição e de retrofit, possibilitando ao utilizador a opção de escolher a

solução que deseja para ser apresentada no relatório final. Desta forma o simulador desenvolvido na presente dissertação apresenta uma superioridade competitiva relativamente aos restantes simuladores no mercado.

Face aos objectivos inicialmente propostos pode-se concluir que o simulador cumpriu os requisitos predefinidos, sendo implementados os dois módulos, rápido e detalhado, no qual o módulo detalhado é ideal para utilizadores com um conhecimento mais técnico do seu sistema de iluminação e consequentemente um relatório mais preciso, enquanto que o módulo rápido apresenta um design mais gráfico e intuitivo, ideal para empresas com pouco conhecimento luminotécnico ou que pretendam obter uma análise e apresentação de soluções num curto espaço de tempo.

Adicionalmente foram analisados dois casos de estudo onde foi possível constatar que as empresas que recorreram ao simulador conseguiram melhorar a sua situação energética, obtendo grandes poupanças energéticas num reduzido período de tempo. A análise dos casos de estudo nesta dissertação é representativa do impacto gerado pelo simulador, sendo até ao momento executadas 418 propostas de iluminação na plataforma S2C.

Em suma o trabalho efectuado foi realizado na EDP Comercial, estando o simulador inserido no projecto S2C e em utilização no mercado. Assim sendo é possível concluir que o facto de estar inserido na entidade EDP facilita o acesso ao simulador, valorizando-o e contribuindo para a melhoria do paradigma da eficiência energética nacional.

## 6.2.Trabalhos futuros

O simulador foi desenvolvido com recurso a alguns dados sugeridos pela EDP, no entanto à medida que as empresas simulam os seus sistemas de iluminação há sempre funcionalidade que podem ser melhoradas e adicionadas por forma a aperfeiçoar todo o processo de simulação do projecto S2C. Desta maneira são apresentados os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

- **Permissão para o utilizador trocar os sistemas de controlo**, visto que em vez de apenas deixar o utilizador descrever o sistema de controlo existente que influencia o consumo por zona, a possibilidade da

troca do sistema de controlo deverá permitir ainda uma maior poupança energética e personalização do espaço, apesar de implicar custos de instalação acrescidos.

- **Estudar os níveis de iluminação natural apresentados em cada sector das empresas**, uma vez que existe a possibilidade de reduzir os desperdícios energéticos através da sugestão de soluções LED's adaptadas para cada espaço.
- **Adicionar a opção de o utilizador escolher uma solução com determinado ângulo de abertura ou nível de iluminância**, tendo em conta que no módulo detalhado poderão existir utilizadores que pretendam determinadas orientações específicas do foco de luz ou valores específicos de iluminância.
- **Incorporação da intensidade luminosa para escolha de soluções**, visto que actualmente apenas só com a presença do auditor se consegue confirmar estes valores. Assim seria importante o simulador conseguir calcular aproximadamente a intensidade luminosa de um local para apresentação de soluções mais personalizadas.





## Bibliografia

- [1] Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética, “Metas ambientais 2020.” [Online]. Available: <http://www.pnaee.pt/pnaee#enquadramentopnaee>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [2] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, “Plano de Promoção de Eficiência no Consumo de Energia Eléctrica.” [Online]. Available: [http://www.erse.pt/pt/planodepromocaodaeficiencianoconsumoppec/ppec17-18/Documents/Relatório ERSE-DGEG de avaliação do PPEC 2017-2018.pdf](http://www.erse.pt/pt/planodepromocaodaeficiencianoconsumoppec/ppec17-18/Documents/Relatório_ERSE-DGEG_de_avaliação_do_PPEC_2017-2018.pdf). [Accessed: 15-Aug-2017].
- [3] Direcção Geral de Energia e Geologia, “Eficiência Energética.” [Online]. Available: <http://www.dgeg.gov.pt/pagina.aspx?js=0&codigono=636364487921AAAAA>. [Accessed: 16-Aug-2017].
- [4] Mark Stanley Rea and Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), *The Lighting Handbook*, 9th ed. 2000.
- [5] OSRAM, “Manual luminotécnico prático.” [Online]. Available: <http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Livros/ManualOsram.pdf>. [Accessed: 16-Aug-2017].
- [6] Philips, “Basics of light and lighting,” *Koninklijke Philips Electronics N.V Philips Lighting Academy*, 2008. [Online]. Available: [http://images.philips.com/is/content/PhilipsConsumer/PDFDownloads/China/ODLI20150914\\_001-UPD-zh\\_CN-basics\\_of\\_light.pdf](http://images.philips.com/is/content/PhilipsConsumer/PDFDownloads/China/ODLI20150914_001-UPD-zh_CN-basics_of_light.pdf). [Accessed: 20-Aug-2017].
- [7] E. Bruce Goldstein, *Sensation and Perception*, 8th ed. Wadsworth Cengage Learning, 2009.
- [8] Giordano B. Beretta, “The LabPQR Color Space,” 2010. [Online]. Available:

- <https://www.slideshare.net/berettag/the-labpqr-color-space>. [Accessed: 26-Aug-2017].
- [9] Schröder, “Conceitos básicos de iluminação.” [Online]. Available: <http://www.schreder.com/pt-pt/learningcenter/conceitosbasicosdeiluminacao>. [Accessed: 27-Aug-2017].
- [10] “Grandezas luminotécnicas.” [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/lxleds/documentacao-tecnica>. [Accessed: 29-Aug-2017].
- [11] “Ângulo Sólido.” [Online]. Available: <http://asselum.com/unidades-luminotecnica-angulo-solido/>. [Accessed: 20-Aug-2018].
- [12] EDP - Distribuição, “Manual de Iluminação Pública,” 2016. [Online]. Available: <https://www.edpdistribuicao.pt/pt/profissionais/EDP Documents/Manual Iluminação Pública.pdf>. [Accessed: 12-Sep-2017].
- [13] Procel EPP, “Manual de Iluminação.” [Online]. Available: [http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/MANUAL+DE+I LUMINACAO+-+PROCEL\\_EPP+-AGOSTO+2011.pdf/d42d2f36-0b90-4fe0-805f-54b862c9692c;jsessionid=A7AE9AD7FFE410D97E371853D50763B0.srv154](http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/MANUAL+DE+I LUMINACAO+-+PROCEL_EPP+-AGOSTO+2011.pdf/d42d2f36-0b90-4fe0-805f-54b862c9692c;jsessionid=A7AE9AD7FFE410D97E371853D50763B0.srv154). [Accessed: 15-Aug-2018].
- [14] AAT, “Fontes Luminosas,” *Unicamp*, 2005. [Online]. Available: [http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/L%E2mpadas/Fontes\\_Lumin.pdf](http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/L%E2mpadas/Fontes_Lumin.pdf). [Accessed: 17-Sep-2017].
- [15] A. Taylor, “Illumination Fundamentals,” *Lighting Research Center (LRC)*, 2000. [Online]. Available: <https://www.lrc.rpi.edu/resources/publications/pdf/illuminationfund.pdf>. [Accessed: 23-Sep-2017].
- [16] OSRAM, “Lâmpadas de descarga de alta intensidade.” [Online]. Available: <https://www.ledvance.pt/produtos/conhecimentos-sobre-o-produto/lampadas-de-descarga-de-alta-pressao/conhecimentos-profissionais/principio-de-operacao-da-descarga-de-gas-de-alta-pressao/index.jsp>. [Accessed: 27-Sep-2017].
- [17] American Electric Lighting (AEL), “High Pressure Sodium Servicing Guide.” [Online]. Available: <http://www.americanelectriclighting.com/Library/Literature/PDFs/HPS Servicing Guide.pdf>. [Accessed: 27-Sep-2017].
- [18] Dick Erdmann, “Metal Halide - Pulse Start vs Probe Start,” 2008. [Online]. Available: [http://www.geappliances.com/email/lighting/specifier/2008\\_07/downloads/MetalHalide\\_Probevspulse.pdf](http://www.geappliances.com/email/lighting/specifier/2008_07/downloads/MetalHalide_Probevspulse.pdf). [Accessed: 28-Sep-2017].

- [19] Rüdiger Ganslandt and Harald Hofmann, "Handbook of Lighting Design," 1992. [Online]. Available: <https://www.erco.com/download/content/30-media/2-handbook/erco-handbook-of-lighting-design-en.pdf>. [Accessed: 29-Sep-2017].
- [20] OSRAM, "Lâmpadas fluorescentes." [Online]. Available: <https://www.ledvance.pt/produtos/conhecimentos-sobre-o-produto/lampadas-fluorescentes/conhecimentos-profissionais/index.jsp>. [Accessed: 03-Oct-2017].
- [21] Lighting Research Center (LRC), "T5 lamps." [Online]. Available: <http://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpiip/lightingAnswers/lat5/pc1.asp>. [Accessed: 10-Oct-2017].
- [22] "Tipos de lâmpadas fluorescentes lineares." [Online]. Available: <http://blog.retrofitcompanies.com/blog/bid/242603/When-Are-Your-Fluorescent-Lights-Being-Discontinued>. [Accessed: 11-Oct-2017].
- [23] Andreia Mirão Carlinhos, "Utilização Eficiente de Sistemas de iluminação." Dissertação Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL), pp. 21-37, 2011.
- [24] Mariangela de Moura, "Iluminação: Análise de Cenários Utilizando a Tecnologia LED." Tese Doutorado. Universidade Federal Fluminense, pp. 46-58, 2015.
- [25] OSRAM, "Guide to Starters." [Online]. Available: <https://www.osram.com/media/.../technical-guide---starter.pdf>. [Accessed: 12-Oct-2017].
- [26] "Circuito arrancador." [Online]. Available: <https://www.techintangent.com/wp-content/uploads/2017/10/1.jpg>. [Accessed: 15-Aug-2018].
- [27] Philips, "Tipos Balastros." [Online]. Available: <http://www.lighting.philips.pt/prof/lighting-electronics/fluorescentes/equipamento-para-fluorescencia-sem-regulacao>. [Accessed: 14-Oct-2017].
- [28] National Lighting Product Information Program (NLPIP), "Electronic Ballasts," 2000. [Online]. Available: <http://www.lrc.rpi.edu/programs/NLPIP/PDF/VIEW/SREB2.pdf>. [Accessed: 28-Oct-2017].
- [29] Philips, "Tabela de Iluminação Profissional," 2014. [Online]. Available: [http://www.eiblda.pt/media/docs/Philips\\_TPIP11-2014.pdf](http://www.eiblda.pt/media/docs/Philips_TPIP11-2014.pdf). [Accessed: 19-Oct-2017].
- [30] Schneider Electric, "Interruptores Crepusculares." [Online]. Available: <https://www.schneider-electric.pt/pt/product-range/843-ic/?parent->

- subcategory-id=1650. [Accessed: 01-Nov-2017].
- [31] LEDVANCE, "LEDVANCE Ferramenta Luminárias LED." [Online]. Available: [https://luminaire.ledvance-calculator.com/pt\\_PT/](https://luminaire.ledvance-calculator.com/pt_PT/). [Accessed: 06-Nov-2017].
- [32] Philips, "Ferramenta para substituição de lâmpadas." [Online]. Available: <http://www.lighting.philips.pt/suporte/suporte-para-produtos/tools/ferramenta-tco-para-substituicao-de-lampadas>. [Accessed: 07-Nov-2017].
- [33] Current, "Ferramenta para estimar o impacto energético e ambiental." [Online]. Available: <http://solutions.currentbyge.com/LightingWeb/br/resources/tools/index.jsp>. [Accessed: 22-Aug-2018].
- [34] EDP, "Save to Compete." [Online]. Available: <https://www.edp.pt/corporate/servicos/save-to-compete/>. [Accessed: 12-Dec-2017].